

課題名 2E-1203 モンゴルの永久凍土地帯における脆弱性評価及び適応策の提言に関する研究

課題代表者名 王 勤学（独立行政法人国立環境研究所地域環境研究センター 主席研究員）

研究実施期間 平成24～26年度

累計予算額 121,179千円（うち26年度38,267千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード モンゴル、凍土融解、気候変動、牧草生産量、環境容量、脆弱性、適応策

研究体制

- (1) 早期観測ネットワークによる永久凍土融解の検出及び脆弱性評価（独立行政法人国立環境研究所）
- (2) 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発と適応策の提言（慶應義塾大学）

研究協力機関

モンゴル科学院地理研究所、モンゴル国立大学、モンゴル気象水文環境研究所
中国科学院乾区寒区環境・工程研究所及び地理科学・資源研究所

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

モンゴルでは、地球温暖化による永久凍土の融解と蒸発散の増大に伴う水資源の喪失が顕著に表れており、それに伴う草原生態系劣化の急速な進行と牧畜経済の衰退が危惧されている。また、モンゴル国民の35%の就業人口を抱える牧畜業において、遊牧民の貧困問題、現金収入を求めての過放牧による牧草地の退化など、様々な環境問題や社会問題が生じており、適応策の策定が緊急の課題となっている。このような背景から、日本環境省とモンゴル自然環境・観光省との間で、「気候変動適応策等を対象とする環境協力に関する覚書」（2011年9月・政策対話において）が締結され、気候変動の適応策に対する政策的なニーズが高まっている。

研究対象地域のモンゴルの永久凍土地域は、シベリア永久凍土区の最南端にあり、モンゴル国土の63%を占めている。この地域では、1940年から2℃ほど年平均気温が上昇しており、調査地点での永久凍土の深さが減少傾向にあることが明らかになった。気候変動に伴う永久凍土の融解は、水資源の減少、草原の砂漠化などをもたらし、牧草生産力や環境容量（家畜収容力）に様々な影響を及ぼすと考えられる。既存の研究では、気候変動と永久凍土の融解や、経済活動と過放牧の関係が明らかにされたものの、永久凍土の融解による水循環の変動と牧草・牧畜量との関係が解明されていない。そのため、科学的なデータに基づいて、永久凍土地域における気候変動や開発活動の影響評価を行い、地域の脆弱性を診断した上で、頑強な適応策の早急な策定が求められている。

2. 研究開発目的

本研究では、気候変動による永久凍土の融解及びそれに伴う陸域生態系の脆弱性を明らかにすると共に、地域の環境容量と牧畜経済の持続性を維持できる頑強な適応政策の提言を行う。得られた情報や研究成果については、国連環境計画（UNEP）のアジア太平洋地域適応ネットワーク（APAN）等を通して、他の地域との共有を図ると同時に、両国の政府関係者や政策決定者に向けて発信し、共有と協力を推進することを目的とする。

3. 研究開発の方法

本研究の目的を達成するため、下記の二つのサブテーマを設けて、お互いに緊密な連携を取りながら、図1に示した方法と手順で研究開発を行う。

(1) 早期観測ネットワークによる永久凍土融解の検出及び脆弱性評価

早期観測ネットワークによる衛星・地上観測データを用いて、モンゴル高原に分布する永久凍土の融解及びそれに伴う陸域生態系の脆弱性を明らかにするため、まず、広域の地表面温度や植生指数等の衛星高次処理データを用いて、永久凍土の分布状況を把握する。また、広域な気象要因、植生被覆及び蒸発散量などのデー

タを用いて、草地生産量の地域分布を推定する。これらの推定結果を検証するため、長期モニタリングを実施する上で、現地調査や測定によって観測データの収集を行う。最終的に、検証された草原地域の現状生産量とサブテーマ(2)で推定された環境容量をオーバーレイすることによって、永久凍土融解に伴う水資源の枯渇、草原の乾燥化及び生産量の低下等の陸域生態系の脆弱性を明らかにする。

(2) 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発と適応策の提言

設定された観測サイト及び実証サイトにおいて気候変動要因及び社会・経済要因が草原地域の環境容量に与える影響評価を行う。また、地域別(郡)の環境容量に基づく適正放牧頭数の推定を行うとともに、適正放牧頭数へ誘導するための適応策(家畜数制御、放牧地域の拡大・移動等)、適応技術(放牧地の水資源利用・整備計画等)の技術・政策オプションの適応効果(環境容量維持効果及び経済効果)を評価するための適応策評価システムを開発し、気候変動に頑強な適応策の提言を行う。得られた情報や研究成果については、国連環境計画(UNEP)のアジア太平洋地域適応ネットワーク(APAN)等を通じて他の地域との共有を図ると同時に、両国の政府関係者や政策決定者に向けて発信し、共有と協力を推進する。

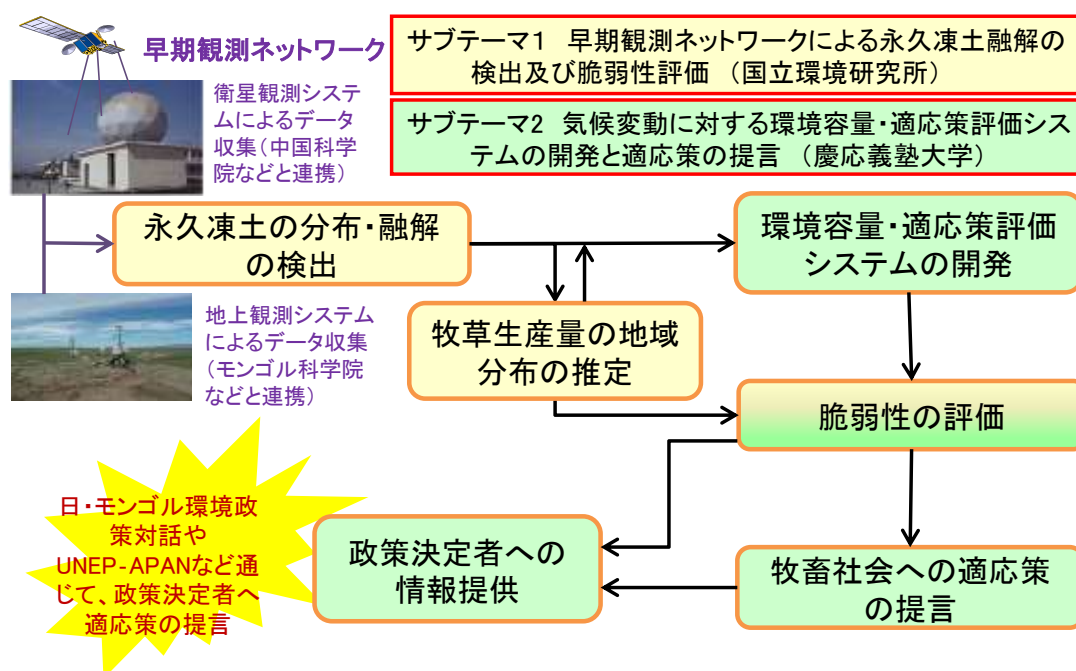


図1 研究開発の方法と手順

4. 結果及び考察

(1) 早期観測ネットワークによる永久凍土融解の検出及び脆弱性評価

本研究では、早期観測ネットワークによる衛星・地上観測データを用いて、モンゴルの永久凍土の分布動態及びそれに伴う陸域生態系の脆弱性を評価した。まず、MODIS衛星による地表面温度データを用いて、1kmメッシュの最新(2000年代)の永久凍土分布図を作成した。それに基づいて、今世紀末(2090年代)の気温平均値が最大4.1℃上昇した場合(IPCC AR5のRCP8.5シナリオ)の予測図も作成した。これにより、今世紀末までに連続・不連続的な永久凍土が僅かしか残らず、特に点状的・島状的な永久凍土地域の面積は現在の1/5程度に縮小すると予測される。次に、凍土融解と牧草フェノロジー及び生産量の関係を明らかにした。その結果、北部の連続・不連続的永久凍土地帯では、牧草の生育期に気温と降水量の影響が小さいため、生産量が高く、安定的に提供できる。一方で、南部の点状的永久凍土、特に季節的凍土地帯では、牧草の生育期に双方からの影響が大きいため、生産量が低く、変動が激しいことが分かった。さらに、推定された牧草生産量を基に、地形、土地利用、草原の種類及び家畜の摂取量等の要因を考慮し、牧草地の環境容量を推定した。現状のソムレベルの放牧頭数と比較することによって放牧庄の地域分布を明らかにした。その結果、中央部、特に首都のウランバートル市周辺地域では、放牧量が収容力を大きく超え、過放牧であることが定量的に判明した。

(1)-1 永久凍土の分布・融解の検出

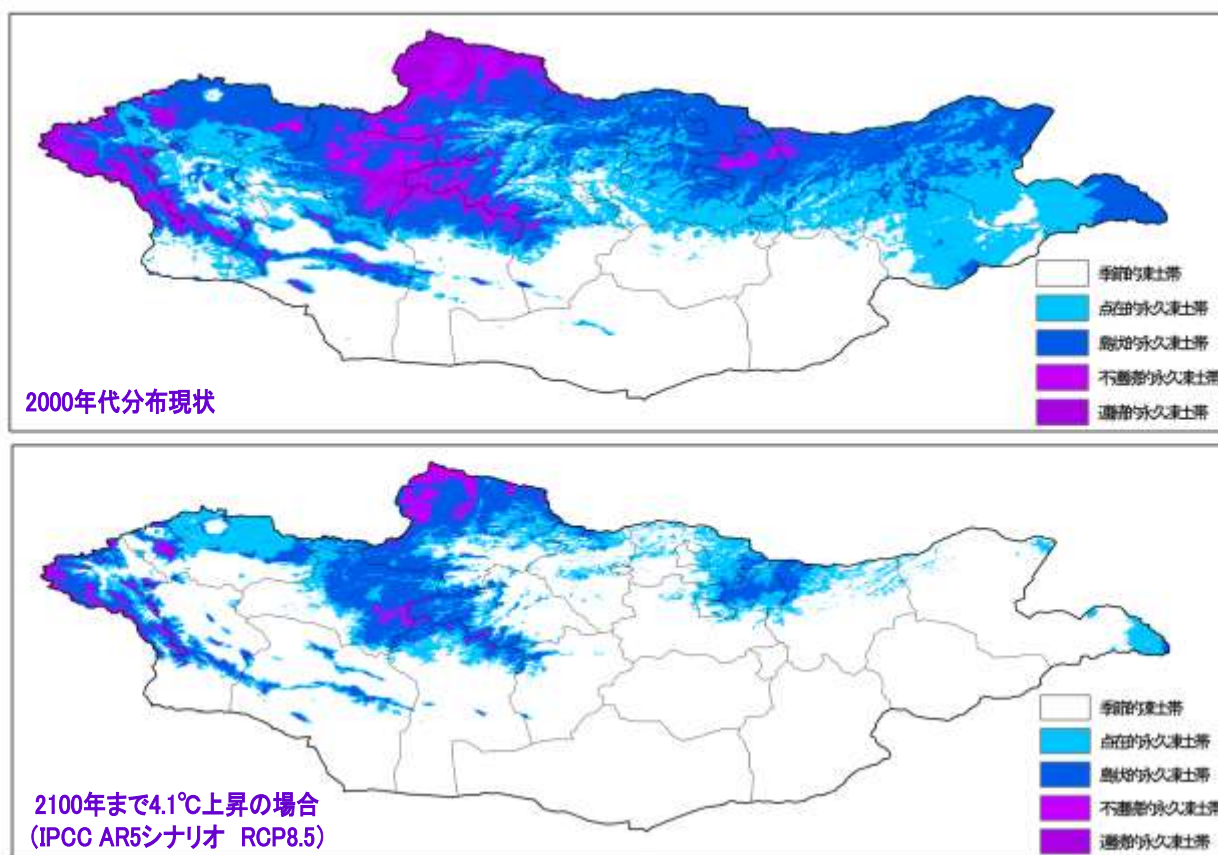
気象観測データの解析によると、1940年以降の70年間、モンゴルの年平均気温は約2.1℃上昇した。そのうち、冬季の平均気温が3.6℃上昇し、最も顕著であり、春季、夏季、秋季ではそれぞれ1.8℃、1.3℃、0.5℃ずつの上昇が見られた。また、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書(AR5)に関連する5つの全球気

候モデル（GCM）モデル（日本のMIROC-ESM、米国のNCAR-CCSM4とNOAA-GFDL-CM3、中国のBCC-CSM1.1及びドイツのMPI-M-ECHAM6）の予測結果によると、2006年から2100年まで温室効果ガスの排出が続けば、モンゴルでの温暖化がさらに進行し、極端な気候現象（干ばつ、雪害、洪水や熱波など）がさらに強まる可能性を示されている。

永久凍土は、気象条件以外に、植生の影響、地質構造や土壌の熱伝導率にも関係しているが、長期的に見れば、永久凍土の分布は気温の積算温度との関係が最も大きい。そのため、凍土の分類には、様々なインデックスが定義されている。その中、Nelsonら（1986、1987）が開発した永久凍土インデックス（PMI）が、凍土分布の推定に最も一般的に使われているインデックスである。

$$PMI=(T^-)^{1/2}/((T^-)^{1/2}+(T^+)^{1/2}) \quad (1)$$

ここで、 T^+ と T^- はそれぞれ融解指数と凍結指数であり、つまり、 T^+ は 0°C 以上の積算温度で、 T^- は 0°C 以下の積算温度である。既存の研究では、PMIの算定には気象観測サイトで観測された気温が使われていたが、観測サイトが過疎であるため、複雑な地形や、植生や土壌表層の特性などの影響が反映されない欠点がある。しかし、衛星観測による地表面温度データは、気温と比べて、植生の影響や土壌表層の特性の影響が反映されているため、永久凍土の分布と最も相関が高いと考えられる。そのため、本研究では地球観測衛星Terra及びAquaに搭載されたMODISセンサーから推定された地表面温度データ（MOD11A2）を用いて、従来の気象観測による数十キロメートルメッシュより遥かに精度の高い1kmメッシュの融解指数と凍結指数及びPMIを算定し、これまでなかった高精度の永久凍土分布図（図（1）-1、上）を作成した。また、本研究では上述の5つのGCMモデルのうち、現地の気温観測データと最も相関の高いドイツのMPI-M-ECHAM6を採用した。このモデルによる代表的濃度パス（RCP）の最大排出量シナリオ（RCP8.5）での予測値を式（1）に入力することで、今世紀末（2090年代）の永久凍土分布の予測図（図（1）-1、下）を作成した。これによると、本世紀末までにモンゴル北部の海拔の高い山頂以外、連続・不連続的な永久凍土が僅かしか残らないだろう。特に、点状的・島状的な永久凍土地域の面積は現在の1/5程度に縮小していけると予想される。



図（1）-1 永久凍土指数PMI（2000-2012年の平均値）を用いて作成した永久凍土分布現状図及び10年間平均気温 4.1°C 上昇した場合（IPCC AR5、RCP8.5シナリオ）の永久凍土分布予測図

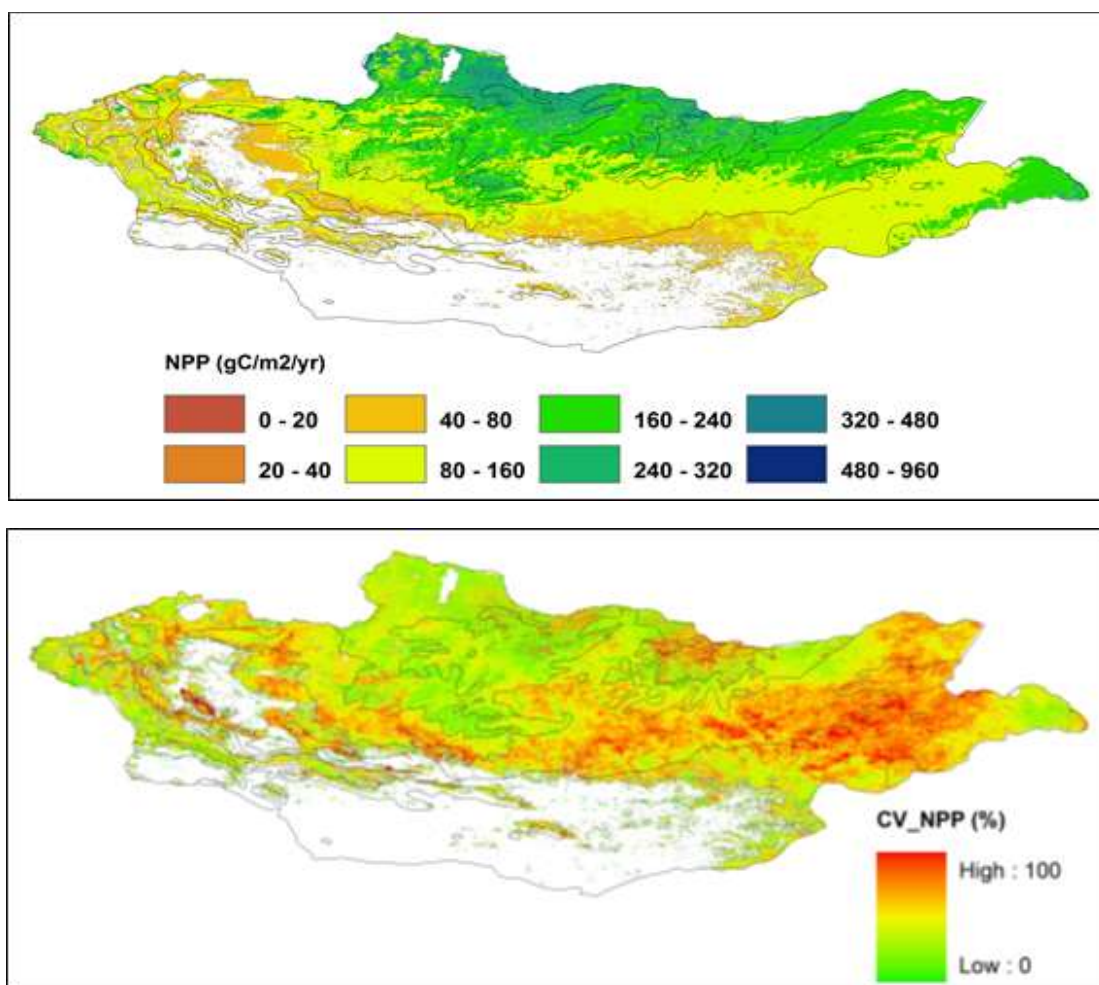
（1）-2 牧草生産量の地域分布の推定

モンゴルでは、全人口の約40%が気候に強く依存している牧畜業に従事している。気候変動は植物の分布や多様性、フェノロジーなどに影響を与え、最終的に牧草・牧畜生産性に影響を与えている。本研究では、まず、

MODIS衛星によるフェノロジーデータ及び気象観測データに基づいて解析した結果、異なる凍土地帯における気候の経年変化に対する牧草のフェノロジーの多様な反応を解明した。その結果、連続的・不連続的永久凍土地帯のステップと森林ステップの生育期の始まり(SOS)、いわゆるグリーンアップ時期も生育期の終わり(EOS)ともに、その他の地域より気温も降水量の経年変化からの影響は小さく、一方で、点状的永久凍土地帯や季節凍土地帯のステップと砂漠ステップのSOSは、気温も降水量の双方からより大きい影響を受けている。さらに、永久凍土地域では、SOSは主に前年の秋の降水量に左右され、つまり、前年の秋季の降水量を貯蔵し、翌年の草原の生育に活かす上で凍土が重要な役割を果たしていることが分かった。

また、地形や土壌特性などのGISデータ、気象や水文観測データ及び植生パラメータなどを生態系モデル(Biome-BGC)に与え、2001-2012年の間の純一次生産量(NPP)及びその変動指数(CV)の分布図(図(1)-2)を算定した。それによると、モンゴル北部の連続・不連続的永久凍土地帯では牧草生産量が高く、しかも安定的に提供できることと、南部の点状的永久凍土及び季節的凍土地帯では、牧草生産量が小さく、安定的に提供できないことを示唆されている。行政のニーズに合わせて、モンゴルのソム(SUM)とアイマグ(AIMAG)など各行政区レベルで集計した。それによると、北部のセレンゲ県、ボルガン県、フブスグル県、トゥブ県及びヘンティー県では、牧草生産量が高いが、南部のウムヌゴビ県、ドルノゴビ県、バヤンホンゴル県では、生産量が低いことが分かった。概して、モンゴルの牧草生産量は「北高南低」と「東高西低」の分布特徴があると定量的に解明した。

さらに、凍土分布類型毎の2000-2012年の草地生産量を集計した。それによると、北部の連続的・不連続的永久凍土地帯では、草地生産量が上昇または減少傾向が見られなかったが、南部の点状的永久凍土地帯と季節的な凍土地帯では、2007年までに減少傾向があったが、それ以降は上昇傾向に転じたことが分かった。



図(1)-2 生態系モデルによる純一次生産量(NPP)及びその変動指数(CV)の分布図(2001-2012年)

(1)-3 永久凍土融解に伴う陸域生態系の脆弱性評価

(1)-3-1 地表面水分不足指数による草地乾燥化の検出

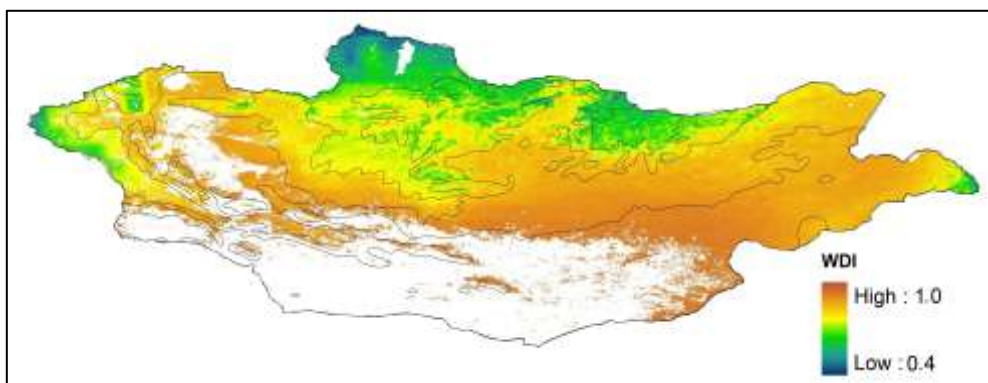
地表面の乾燥状態を表す指標として、水分不足指数(WDI: Water Deficit Index)を用いた。この指標はMoranら(1994)において考案された乾燥指数の一つであり、測定困難な土壌水分の代わりに、地表面の水分不足状

況を表す最も便利な指標として広く使用されてきた。WDIの推定モデルの基本式は式(2)で示す。

$$\text{WDI} = 1 - \text{ET} / \text{PET} \quad (2)$$

ここで、ETは地表面の実蒸発散量であるが、PETは可能蒸発量である。本研究では、2000-2012年のMODIS衛星によるETとPETデータ(MOD16)を用いて推定したWDIの分布図である。それによると、モンゴル北部の連続・不連続的な永久凍土地帯では、WDIが小さく、地表面の乾燥状態は「正常」か「軽度な旱魃」の範囲内であるが、南部の点状的な永久凍土地帯や季節的な凍土地帯では、WDIが0.7を超え、地表面の乾燥状態は「中度から極度な旱魃」となっていることが分かった(図(1)-3)。

また、WDIの変動指数(CV)の分布によると、モンゴル北部の連続・不連続的な永久凍土地帯では地表面の水分が多く、植生の成長に水分ストレスが小さいが、南部の宏大な季節凍土地域では地表面が乾燥していて、植生の成長に大きなストレスを与えていると考えられる。



図(1)-3 水分不足指数(WDI)の平均値(2000-2012年)の分布図

(1)-3-2 永久凍土の融解と干ばつ、放牧などの関係解明

モンゴルでは、永久凍土がユーラシア大陸の雪氷圏の南端に位置しているため、温度上昇で始まった永久凍土の融解が異常気象や人為的活動の影響によってさらに加速された可能性が高い。本研究は永久凍土の融解と干ばつ、放牧などの関係を解明するため、ウランバートル付近の典型草原におけるNalaikhサイトで行われた集中観測データを用いて、SHAWモデルに入力することで凍土融解のメカニズム及びそれと干ばつや過放牧との関係を解明するための数値実験を行った。

① 干ばつと永久凍土の融解に関する解析結果

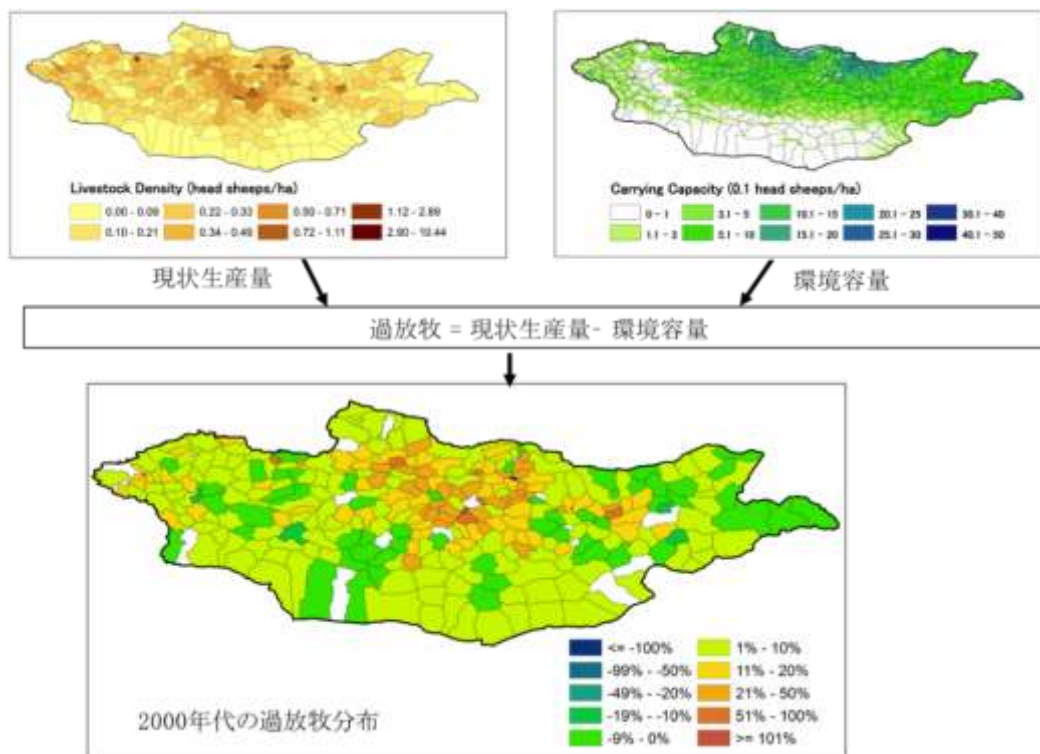
数値実験の結果によると、干ばつは活動層下部からの水分損失をもたらし、その結果、活動層の深さ(ALD)は土壌含水量の減少に応じて増加した。つまり、干ばつが永久凍土の融解を加速させることを示唆している。また、3つの降水シナリオ(1.5P, 1.75P, 2P)のシミュレーションの結果によると、降水量が増えた場合、土壌層に水分が涵養され、活動層が浅くなった。その反面、降水量の減少による干ばつは、地表面の温度を上昇させ、蒸発散の増大や活動層の乾燥化をもたらし、永久凍土の融解につながると考えられる。

② 放牧と永久凍土の融解に関する解析結果

本研究では、放牧強度(放牧なし、軽度放牧、中度放牧、強度放牧、過放牧など五つの放牧シナリオ)が永久凍土に及ぼす影響を評価した。その結果、湿潤な永久凍土においては、放牧強度は活動層の深さ(ALD)への影響はほとんど見られないが、乾燥な永久凍土においては、放牧強度はALDを増大させる傾向があった。また、シミュレーション結果は、干ばつと過放牧が温暖化と同時に起これば、モンゴルの永久凍土の融解をさらに加速させる可能性を示唆した。

(1)-3-3 環境容量を超えた過放牧地域の検出

牧畜の潜在的生産量(所謂環境容量)は、牧草生産量、家畜の嗜好性と要求量、さらに地形、傾斜度、水場などの影響を考慮して求められる。本研究では、推定した純一生産量(NPP)、植生類型、家畜の嗜好性と要求量、さらに傾斜度や水不足指数などの関連パラメータを開発した環境容量評価モデルに入力することによって、モンゴル草原の環境容量を推定した。それによると、モンゴル北部の連続・不連続永久凍土地域では環境容量は2~4頭/ヘクタールになるが、南部は0.5頭/ヘクタール以下であることが分かった。さらに、推定したソムレベルの環境容量と現状の家畜頭数の差による放牧圧の分布状況(図(1)-4)を推定した。それによると、モンゴル中央部、特に首都のウランバートル市周辺地域では、家畜放牧量は環境容量を大きく超え、過放牧していることが定量的に判明した。



図(1)-4 推定した草原の環境容量と現状の家畜頭数の差による放牧圧の分布図

(2) 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発と適応策の提言

本研究では、まず、気候変動による影響評価として、SHAWモデルによる凍土の融解解析を行った。解析結果から実証サイトにおいては、過去40年間(1970年～2010年)で凍土の融解が進んだ結果、2000年代半ば以降、凍土からの流出が無くなっている事が分かった。土壌からの水分供給不足は、植物の成長不良及び家畜の生育不良に関連していると考えられ、ゾド発生時には家畜被害を大きくする可能性が高いと示唆された。草原の環境容量については、SimSAGSによる評価システムを開発した。解析結果から、家畜数が環境容量を大きく超え、過放牧状態であるが判明した。また、同モデルを用いてADBのプロジェクトで設置された水場の適応効果について評価を行った。水場を新設する事により、特定の牧草地への過剰な負荷を軽減する事が確かめられた。

次に、牧畜社会の脆弱性評価については、干ばつ・ゾド指標に家畜の草摂取量及び干し草収穫量の指標を加えた新しい脆弱性指標の開発を行った。開発した脆弱性指標と家畜減耗率の関係から、指標値が0.2を超えると家畜減耗率が増加する事を初めて見出した。

最後に、適応策による経済的効果については、応用一般均衡モデルによる経済効果評価システムを開発した。経済効果の分析結果から、モンゴルにおける食肉産業においては、食肉処理と流通に関する技術の向上が早急に必要である事が分かった。家畜総量規制政策への提言としては、モンゴルにおける食肉価格の変動に着目した食肉売却による経済的インセンティブを伴った放牧頭数の抑制及び個人所有の家畜数に対する累進課税、及び放牧地への水資源利用・整備計画について検討を行った。政策決定者に向けて、慶應義塾大学に設置されたUNEP-APAN慶應ノードや慶應義塾大学で開催されたAPAN北東アジア年次会議を通じて気候変動に対する脆弱性評価及び適応策の策定に関する情報配信を行った。

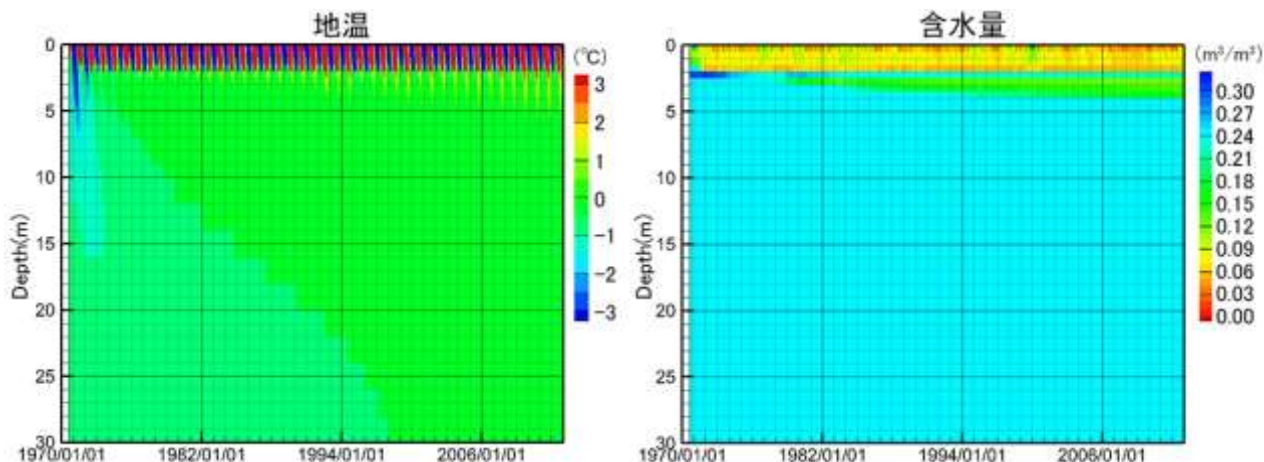
(2)-1 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発

本研究では、気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発を行った。本システムは、気候変動が草原環境に与える影響を評価するための気候変動影響評価システム、社会・経済的要因が環境容量に与える影響を評価するための環境容量評価システム、環境劣化と家畜被害の関係を評価するための牧畜社会の脆弱性評価システム、及び適応策の経済評価を行うための経済効果評価システムによる4つの評価システムから構成されている。

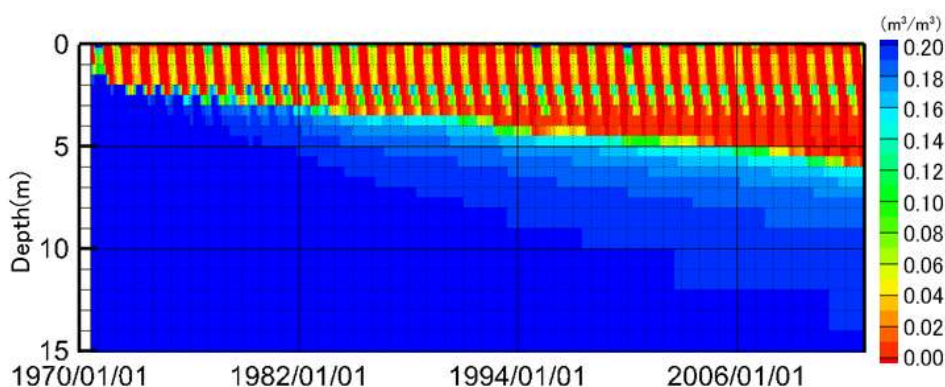
(2)-1-1 気候変動影響評価システム

気候変動が草原環境に与える影響を明らかにするため、SHAW(Simultaneous Heat and Water)モデルによる凍土融解解析を行った。本研究では、モデルの検証を(独)国立環境研究所とモンゴル科学院地理研究所が共同で設置したNalaikh試験ステーションを対象に行った。対象の地表面被覆はsteppeであり、地下に凍土層が広がっている。永久凍土分布では不連続的な永久凍土と分類されている。

Nalaikhにおける過去40年間の地温と土壌含水量の計算を行った結果(図(2)-1)、夏季における地温の上昇深度が1970年代では2m程度であったものが、2000年以降は4m程度にまで達し、気温上昇の影響が地下に波及している事が分かった。また、土壌含水量についても年々減少しており、乾燥化が進行している事が分かった。図(2)-2に示す凍土割合分布からは、凍土の活動層が地下1m程度から地下6m程度まで増加しており、気候変動の影響が凍土の融解として顕在化している事が示された。

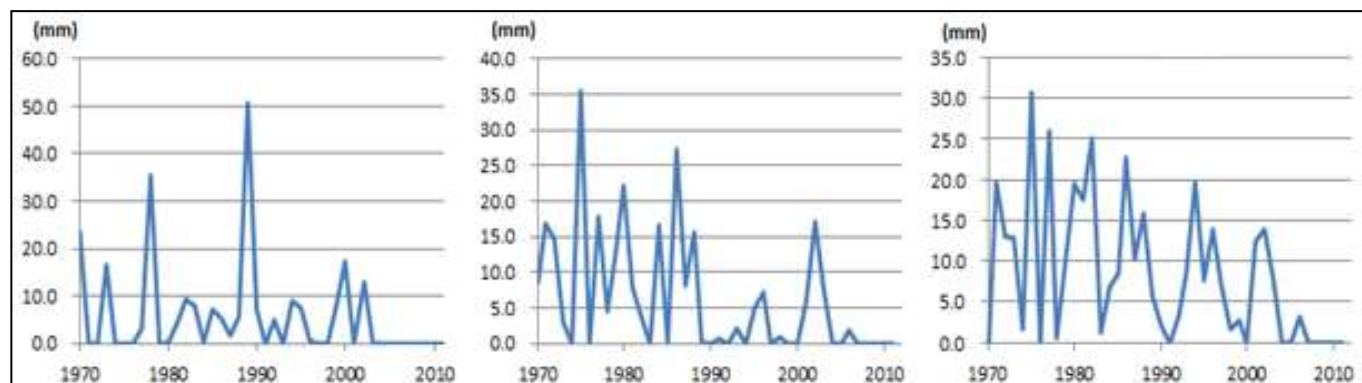


図(2)-1 Nalaikhにおける地温と土壌含水量の計算結果(1970/8/10~2012/12/31)



図(2)-2 Nalaikhにおける凍土割合分布

本研究では、Nalaikhにおける凍土融解解析結果を踏まえ、(独)国立環境研究所とモンゴル科学院地理研究所が共同で設置したDavaat試験ステーションのForest及びSteppeの2地点を追加し、凍土からの流出量を求めた。過去40年間の流出量計算結果を図(2)-3に示す。



図(2)-3 流出量(左:Nalaikh、中央:Davaat Forest、右:Davaat Steppe)

図(2)-3に示す結果から、3つの実証サイトの全てにおいて2005年前後から流出量が無くなっている事が分かった。降雨の少ないモンゴルでは、凍土から流出した水分が側物の成長に欠かせない。凍土からの流出量の低下は、植物の成長不良及び草を餌とする家畜の生育不良を引き起こす可能性がある。このため、本研究では、凍土からの流出量の減少が牧草の成長に与える影響について衛星観測データを用いた調査を行った。ここでの調査は、通算日の97日から224日まで16日毎に合成した8枚の時系列NDVI画像(植生指標)を比較し、NDVIの値が最も急激に増加した期間を植物の成長開始期として求めるものである。本研究では、Nalaikhを対象に2000

年から2012年について成長開始期を求めた後、2000年と比較して成長開始期の違いを纏めた。成長開始期の違いを表(2)-1に示す。

表(2)-1 2000年を基準とした成長開始期の変化(Nalaikh)

年	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
成長開始期	遅い	同じ	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	同じ	遅い	遅い

表(2)-1の結果からは、Nalaikhにおける植物の成長開始期は、2000年と比較してほとんどの年で遅れている事が分かる。2002年と2010年については、2000年と同時期であるが、2002年では、図(2)-3のNalaikhの流出量から分かるように土壌からの水分供給が機能していたためであり、2010年については、土壌からの水分供給が絶たれている一方、現地の気象観測から例年にない纏まった雨が5月にあった事が分かっている。これらの結果から、モンゴルでは気候変動の影響が永久凍土の融解と土壌水分の喪失を通じて草原植物の成長にも影響が及んでいる事が明らかになった。

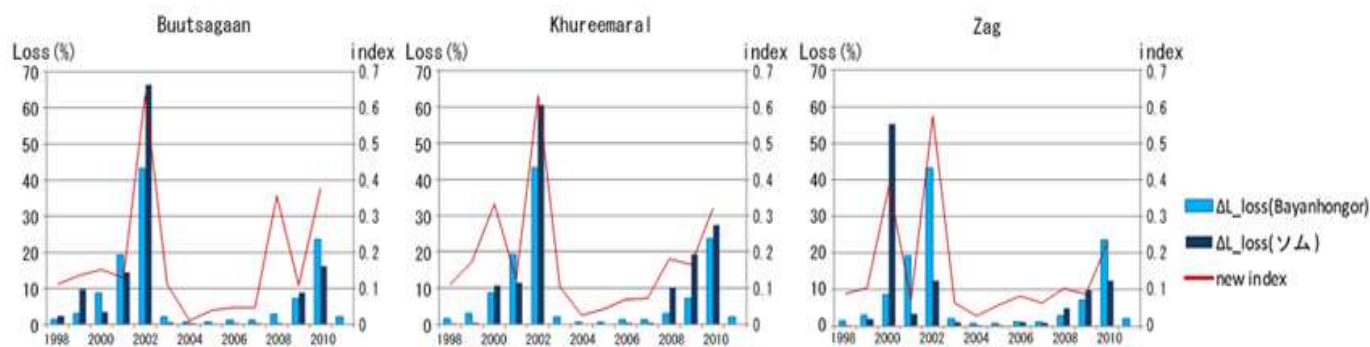
(2)-1-2 環境容量評価システム

モンゴルでは、市場経済移行後、所得の増加を求めた牧童によって過放牧が進み、草原環境が急速に劣化している。本研究では、このような社会・経済的要因が草原環境に与える影響について、SimSAGSモデルを用いた環境容量を評価するシステムを開発した。対象地域は、Nalaikhサイトに近いTov県Bayanソムであり、1991年4月と2005年4月を起点とした2ケースについて実施した。計算対象は羊とヤギである。解析結果から移動面積を家畜数で割ると家畜1頭の飼育に必要な牧草地の面積が求まる。ここで、家畜の消費量が同じであれば、家畜の飼育に必要な牧草地の増加分は単位面積当りの草の量(環境容量)が減少した事を意味する。解析結果では、羊については36.5%の減少、ヤギは5.3%の減少となった。羊に比べヤギの減少は非常に小さいが、これは、羊とヤギの摂餌行動の違い(ヤギは草の根や木の皮も食べる)等が影響していると思われる。このため、ヤギの飼育に必要な面積が著しく増加すれば、牧草地の荒廃はかなり進行していると考えられる。

次に、本研究では、環境容量評価システムを用いて実際の適応策について評価を行った。対象としたプロジェクトは、ADB(アジア開発銀行)がモンゴルで実施した、水場の修復及び新設を行うプロジェクトである。このプロジェクトでは、新しい水場を整備する事によってこれまで未利用であった牧草地の有効利用が期待できる。今回検証を行う地域は、Bayanhonger県Khureemaraソムであり、計算期間は1991年を起点とした3年間である。結果からは、水場を新設する事により羊が増加する事が分かった。しかしながら、羊の分布範囲に関しては、新しく整備した水場である1、6番周辺に羊が分布する反面、3~5番の水場周辺においては羊が少なく、水場の整備による効果が小さい事が分かる。本事例から、環境容量評価システムを用いる事で、プロジェクトの実施以前にプロジェクトの効果がある程度で推定する事が可能である事が分かった。

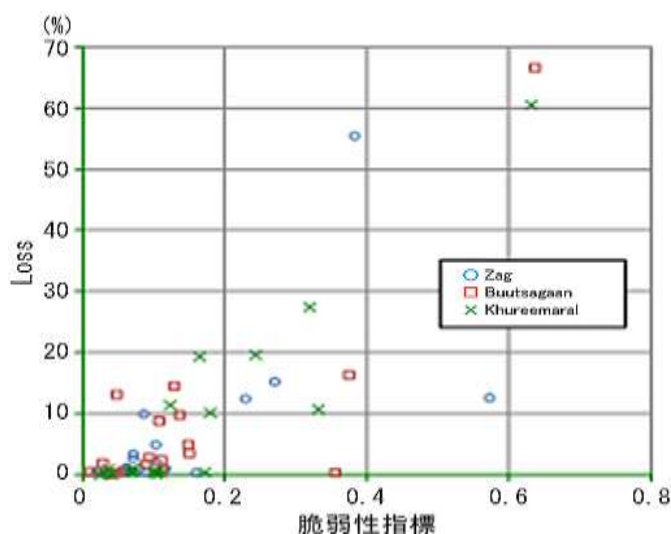
(2)-1-3 脆弱性評価システム

近年、モンゴルではゾドによる家畜の大量死が頻発している。家畜被害の低減には、ゾド発生予測に基づいた牧草備蓄、家畜移動または早期食肉化等が有効であると考えられているが、予測精度は必ずしも高いとは言えない。このため、本研究では、従来のDrought-Zud指標に加え、家畜の草摂餌量及び備蓄飼料(干し草収穫量)を正規化した指標とし、これら3つの指標を用いた新しい脆弱性評価システムの開発を行った。対象地域は、Bayanhongor県の3つのソム(Buutsagaan、Khureemara、Zag)である。図(2)-4に1998年から2011年における家畜消耗率と新しい脆弱性指標を示す。また、図(2)-5に3つのソムでの脆弱性指標と家畜減耗率の関係を示す。図(2)-4では、2008年のBuutsagaanソムを除き、新しい脆弱性指標と家畜減耗率との間で非常に良好な対応関係が得られている事が分かる。



図(2)-4 家畜消耗率と脆弱性指標の推移(1998年~2011年)

また、図(2)-5の脆弱性指標と家畜減耗率の関係からは、脆弱性指標値が0.2以上となる場合、10%以上の家畜の大量死がかなりの確率で発生する可能性がある事が判明した。この事から、脆弱性指標に閾値(0.2)が存在する事が明らかになるとともに、脆弱性指標値を閾値(0.2)以下に低減させる事が適応策の目標値として設定し得る事が初めて判明した。これにより、適応策の実施による適応効果を定量的に評価する事が可能となった。



図(2)-5 脆弱性指標と家畜減耗率の関係

(2)-1-4 経済効果評価システム

モンゴルを対象として、ゾド(雪害)による家畜の大量死が牧畜業への経済的影響を表すものとして、牧畜業の生産性が減少するシナリオ、放牧頭数管理と環境容量維持による牧畜部門の生産性が増加するシナリオ、及び食肉の輸出振興政策が経済に及ぼす影響について応用一般均衡モデルによる評価を行った。入力データには2010年のモンゴルの32部門に分割されたIO表(産業連関表)を用いた。

牧畜業の生産性が減少するシナリオでは、生産財である家畜を利用する食品加工や繊維・皮革産業の生産にも負の影響をもたらす一方、鉱物部門(石炭石油採掘、金属採掘)では逆に生産が増加する結果となった。マクロ変数への影響に関しては、GDPが大きく減少する結果となった。要因の一つは失業率の上昇である。牧畜業は、産業に比較的大きなシェアを占めているため、牧畜業の下流部門である食品加工、繊維・皮革産業に対しても負の影響が生じ、これらの部門で減少した雇用の多くはそのまま失業に結びつくことになった。

牧畜業の生産性が上昇するケースでは、牧畜業の生産が大きく増加する反面、繊維・皮革産業、食品加工の生産はそれほど増加しない。生産性上昇のケースと生産性低下のケースでは必ずしも対照的な結果にはならない事が分かった。

輸出振興政策のケースでは、a)輸出が5倍、b)輸出が5倍で輸出価格が国内価格の2倍、及びc)輸出が5倍で輸出価格が国内価格の3倍となる3つのケースについて分析を行った。輸出振興政策のケースにおけるマクロ変数への影響については、食品加工部門の輸出を5倍にする政策とした場合、食品加工部門の生産は増加するが、他の部門の生産が減少する傾向が見られた。これは牧畜業の生産財が、食品加工の原料として用いられる事により、繊維・皮革産業の生産が減少するためである。同様に石炭石油採掘と金属採掘の生産も減少する。マクロ変数への影響については、a)ではGDPが減少し、b)とc)ではGDPは増加する。これは、GDPへの効果は輸出価格によって大きく変わるという事を意味する。輸出価格が高いと同じ輸出による収入は多くなり、中間財を多く輸入できる事から生産は増加する。また可処分所得や消費もGDPと同じ様の動きを示し、輸出価格によって結果が変わる。この事から食肉の輸出価格が国内価格と変わらないなら輸出振興政策はマクロ変数を悪化させ、輸出価格が十分国内価格よりも高ければマクロ変数は改善する事になる。首都ウランバートルから遠い地方では、中国の業者が市場価格よりも格段に安い金額で家畜を購入している。このような家畜の売却(輸出)は、マクロ変数を悪化させる原因になる。輸出振興策の分析結果から、国内よりも高値で輸出できる食肉製品の製造技術(食肉処理、加工技術)の向上及び流通システムの整備が必要である事が分かる。

(2)-2 牧畜社会への適応策の提言

本研究では、牧畜社会への適応策の提言として、モンゴルにおける食肉価格の変動に着目した食肉売却による経済的インセンティブを伴った放牧頭数の抑制及び個人所有の家畜数に対する課税について提言を行った。また、放牧地への水資源利用・整備計画として多くの援助機関で行われている水場新設の効果的な配置・選定に

についての提言を行った。

(2)-2-1 経済的インセンティブによる放牧頭数の抑制

モンゴルにおける草原環境の劣化には、牧童による過放牧の影響が大きい。しかしながら、牧童に対する何らかの経済的なインセンティブを確保せずに家畜の頭数制限を行う事は、経済的に貧しい牧童達の反発を招く可能性が大きい。モンゴルにおける食肉の価格は、春から初夏にかけて上昇し秋から冬季に下落する。このため、食肉価格が高い時期に食肉を売ればこれまでよりも多くの利益が得られる事を意味する。過放牧は、所得の少ない牧童が収入の増加を求めて行うものであるが、価格の高い時期に合わせて食肉を供給するだけで牧童は環境負荷の大きな過放牧に頼らなくても、より多くの収入を得る事が可能となる。また、この考え方は、年間を通じて食肉を安定的に供給する事に繋がるため、食肉の供給量と価格の面から消費者にとっても都合が良い。しかしながら、現在のモンゴルでは、食肉を冷凍貯蔵するため施設が整備されていない。このため、食肉価格差に基づく収入の増加をインセンティブとした牧童による過放牧の抑制を実現するためには、食肉の冷凍貯蔵を行うための設備の導入及び食肉流通能力の向上が必要である。

(2)-2-2 累進課税による放牧頭数の抑制

モンゴルでは、一般的な牧童の家族は4人家族であるため、1家族当たり200頭の家畜以下については無税、200頭を超える家畜に対して累進的に課税をかける事になる。現在、牧童に対して一律の税がかけられており、生産手段である牧草地保全のために牧草使用料を支払う事については、牧童の間で基本的に合意できるものと考えられる。しかしながら、このような一律の税は、少数の大規模牧場経営の牧童に有利であり、家畜頭数が500頭以下の多くの零細な牧童家族にとっては不利な税制である。また、一律の税では、家畜数の増加に歯止めをかける事はできない。このため、累進課税の導入は、牧童にとって非常に公正な方法であると考えられるが、閾値や累進税率の決め方については、政治に深くからむ部分であり、合意は容易ではない。ここで、モンゴルにおけるゾド発生と家畜数について考えると、1990年以前の社会主義経済下では、家畜頭数は長く最大2千5百万頭を超える事はなく、自然現象としてのゾドは1976～1977年に発生しただけであった。しかし、2000年以降の家畜総数の増加は、長いモンゴルの伝統的な放牧社会で行われていた家畜頭数を遥かに超えている。モンゴルにおける家畜総量規制政策については、1990年以前の家畜頭数及び現在の牧畜業従事者の数から累進税率に係る閾値や税率について検討する必要がある。

(2)-2-3 放牧地への水資源利用・整備計画の提言

モンゴルでは、市場経済移行後、資金や部品の不足などから使用できない井戸(水場)が増えている一方、過放牧による家畜の数は増加している。放牧においては、家畜の餌となる草と同様、水も必要であるため、必然的に利用可能な水場を中心に草原環境が劣化していく事になる。本研究では、SimSAGSモデルによる環境容量評価システムを用いて、アジア開発銀行(ADB)が実施した水場の新設による牧畜への効果を調べた。調査を行ったBayanhonger県のKhureemaraalソムでは、水場を新設する事で家畜が増加し、家畜の分布が広がる事が確かめられたが、新設した水場の中には家畜の分布がほとんど見られない場所もあった。このため、水場の新設が必ずしも家畜の飼育に効果的であるとは言えないことが分かった。これらの結果から適切な位置に水場を設置しなければ、期待した効果が得られない事が分かる。このため、適応策の策定等においては、実施場所等について事前によく計画を吟味する必要がある事が分かった。家畜の移動には、地形や標高、草の密度等も影響する。このため、水場の設置に関しては、地形や標高及び衛星による植物活性度等の情報を用いて最適な水場の選定を行う必要があると言える。

(2)-3 政策決定者への情報提供

本研究で得られた知見や家畜総量規制政策への提言等を政策決定者に提供するため、UNEPのアジア太平洋地域適応ネットワーク(APAN)によるシンポジウムや会議等での情報発信及び慶應義塾大学に設置されたKEIO-Node(<http://www.rc3a.org/>)を通じた気候変動に関する情報配信を行った。

2015年3月4日、慶應義塾大学RCCCA(Research Center for Climate Change Adaptation)が、慶應義塾大学日吉キャンパスにおいて同時開催した第5回環境イノベータシンポジウムとAPAN北東アジア年次会議では、北東アジア等から合計45人の参加者及び14人の登壇者を迎え、「大規模な変化」と適応策におけるギャップを主テーマに一般参加者、学生、政策決定者、NPO、研究者等がそれぞれの適応策におけるギャップ理解について相互の確認と解決策に向けた議論が行われた。北東アジアでは、大規模な人口移動や都市への集中、自然災害の頻発、伝染病の急速な蔓延が起こっている。一方、地球温暖化や高齢化、環境汚染や生態系の悪化等は漸進しており、その影響も十分に把握する事が困難な状況にある。これらは、「脆弱さ」の原因であり、北東アジアがあらゆる「大規模な変化」に対して最も脆弱な地域の一つである事を結論づけている。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

まず、MODIS衛星による地表面温度データを用いて、1kmメッシュの最新(2000年代)の永久凍土分布図を初めて作成した。それに基づいて、今世紀末(2090年代)の気温平均値が最大4.1℃上昇した場合(IPCC AR5のRCP8.5シナリオ)の予測図も作成した。これにより、今世紀末までに連続・不連続的な永久凍土が僅かしか残らず、特に点状的・島状的な永久凍土地域の面積は現在の1/5程度に縮小すると予測される。

次に、凍土融解と牧草フェノロジー及び生産量の関係を明らかにした。その結果、北部の連続・不連続の永久凍土地帯では、牧草の生育期に気温と降水量の影響が小さいため、生産量が高く、安定的に提供できる。一方で、南部の点状的永久凍土、特に季節的凍土地帯では、生産量が低く、変動が激しいことが分かった。これらの成果は、遊牧民の放牧範囲と強度の決定に意義が大きい。

さらに、牧草生産量を基づいて推定された環境容量と現状の放牧頭数と比較することによって放牧圧の地域分布を明らかにした。その結果、中央部、特に首都のウランバートル市周辺地域では、放牧量が収容力を大きく超え、過放牧であることが定量的に判明した。これらの成果は、環境容量に基づく家畜頭数制限と草原保全政策の根拠資料になる。

最後に、気候変動の影響は高緯度地域の永久凍土の融解と蒸発散による水資源喪失、及び大干ばつの頻発による草地への水資源供給の著しい減少として顕著に表れており、家畜増加による過放牧と相まって草原生産力劣化が急速に進行している。脆弱性指標(気温、降水量、牧草量、備蓄干し草量の関数)と家畜減耗率の関係から、指標値が0.2を超えると家畜減耗率が増加することが見出され、脆弱性指標値に閾値(0.2)が存在することが明らかになった。このことから脆弱性指標値を閾値(0.2)以下に低減させることが適応策の目標値として設定し得ることが初めて判明した。このように、脆弱性を低下させる適応策の具体的数値目標が定量的に示されたことにより、適応策の実施による適応効果を定量的に評価することが可能となった。

UNFCCCの適応委員会をはじめとして世界的に適応効果の定量的な評価の重要性が指摘されているが、科学的データに基づく評価方法は提示されてこなかった。今回モンゴルにおいて初めて脆弱性とLoss&Damageとの定量的な関係性を提示し、かつ脆弱性指標値に閾値が存在することを明らかにした意義は大きい。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省が平成26年度に行った「2020年以降の気候変動枠組における適応のあり方に関する懇談会」において、モンゴルにおける科学的知見を用いた適応計画への反映経験をもとに、2015年合意(2020年以降の気候変動に関する新たな枠組み)の中で、日本国として位置づけるべき適応の要素に対する考え方を提言した。

また、2020年以降の温室効果ガス排出削減の新たな枠組みにおける「適応」の位置づけについて、モンゴルで行っている「適応」と「緩和」の両方が満たされるような「グリーン開発」の事例をもとに「適応」の位置づけについての提言を行った。

さらに、平成25年8月2日に開催された第8回「日本・モンゴル環境政策対話」及び平成26年3月17日に開催された第9回「日・モンゴル環境政策対話」において、本研究結果である気候変動に対するモンゴル草原及び牧畜社会の脆弱性評価、早期ゾド予報と適応オプション選択、適応策の経済的効果の評価、環境容量に基づく家畜頭数制限と草原保全等について、モンゴルでの気候変動適応策として提言を行い、モンゴル政府の環境政策に貢献した。

本研究により得られた研究成果を国連のアジア太平洋地域適応ネットワーク(APAN)等を通じ各国の政府関係者や政策決定者に向けて情報発信を行った結果、知見等の共有を行う事ができた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

日本政府とモンゴル政府は2015年2月10日に日・モンゴル経済連携協定(EPA)を締結した。食肉輸出による高付加価値商品へのインセンティブ付加が、環境容量の維持による草原保全をもたらすと同時に、GDPへの貢献をもたらすという本研究で行った適応策の経済効果の評価で得られた成果が有効に機能する可能性を示しており、結果として日・モンゴル経済連携協定(EPA)の環境政策への効果についても貢献したと考えている。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) T-H. WU, Q-X. WANG, L. ZHAO, E. DU, W. WANG, O. BATKHISHIG, B. DORIGOTOV, and M. Watanabe: Environmental Earth Sciences. 67 (7) : 1869-1876 (2012)
“Investigating internal structure of permafrost using conventional methods and ground-penetrating radar at Honhor basin, Mongolia”
- 2) T-H. WU, L. ZHAO, R. LI, Q-X. WANG, C-W. XIE, Q-Q. PANG: International Journal of Climatology, (33) , 920-930 (2013)
“Recent ground surface warming and its effects on permafrost on the central Qinghai-Tibet Plateau”
- 3) W-W. XIAO, Z. SUN, Q-X. WANG, Y-H YANG: J. Appl. Remote Sens., 7 (1) , 073562 (2013)
“Evaluating MODIS phenology product for rotating croplands through ground observations”
- 4) Z. SUN, M. GEBREMICHAEL, Q-X WANG, J. WANG, T.W. SAMMIS, A. NICKLESS: Remote Sensing, 5 (10) , 4735-4752 (2013)
“Evaluation of Clear-Sky Incoming Radiation Estimating Equations Typically Used in Remote Sensing Evapotranspiration Algorithms”
- 5) Z. SUN, M. GEBREMICHAEL, Q-X WANG: Journal of the Meteorological Society of Japan, 91 (5) , 627-638 (2013)
“Evaluation of Empirical Remote Sensing-Based Equations for Estimating Soil Heat Flux”
- 6) 2013 Z. SUN, Q-X WANG, B. MATSUSHITA, T. FUKUSHIMA, Z. OUYANG, M. Watanabe, M. GEBREMICHAEL: Hydrological Sciences Journal, 58 (5) , 994-1012 (2013)
“Further evaluation of the Sim-ReSET model for ET estimation driven by only satellite inputs”
- 7) Q-X. WANG and O. Batkhishig: J Ecosys Ecograph. 4:140 (2014)
“Impact of Overgrazing on Semiarid Ecosystem Soil Properties: A Case Study of the Eastern Hovsgol Lake Area, Mongolia”
- 8) 大場章弘、巖網林 : 沙漠研究, 24 (2) , 285-294 (2014)
「景観生態区分による村落レベルの牧草生産力の評価」
- 9) Z. Sun, Q-X WANG, Q-A Xiao et al : Remote Sens. 7, 360-377 (2015)
“Diverse Responses of Remotely Sensed Grassland Phenology to Inter-annual Climate Variability over Frozen Ground Regions in Mongolia”

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 岡寺智大 : 環境情報科学学術研究論文集, 28, 125-130 (2014)
「モンゴルの電力供給と水需要」

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) C. LIU, Q-X. WANG AND T. YASUNARI: Proceedings of the 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Enkh-Amgalan S, Amangul Sh. (eds.) . ©Institute of Geography, MAS, Ulaanbaatar, Mongolia, 29-33 (2012)
“Impact of Human Activities on Regional Nitrogen Balance in East Asia”
- 2) O. BATKHISHIG AND Q-X. WANG: Proceedings of the 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Enkh-Amgalan S, Amangul Sh. (eds.) . ©Institute of Geography, MAS, Ulaanbaatar, Mongolia, 7-9 (2012)
“Climate Change and its Impact on Soil Degradation in Mongolia”
- 3) Q-X. WANG, M. Watanabe, O. BATKHISHIG, T-H. WU AND J-Y. LIU: Proceedings of the 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Enkh-Amgalan S, Amangul Sh. (eds.) . ©Institute of Geography, MAS, Ulaanbaatar, Mongolia, 111-116 (2012)
“Detecting Permafrost Degradation and Ecosystem Vulnerability in Mongolia using an Early

Warning Monitoring Network”

- 4) T-H. WU, Q-X. WANG, L. ZHAO, R. LI, C. XIE, Q. PANG, O. BATKHISHIG and B. DORJGOTOV: Extended Abstracts of 10th International Conference on Permafrost. Vol. 4, Hinkel, K.M. (ed.) . The Northern Publisher, Salekhard, Russia, 589-590 (2012)
“Permafrost degradation under abrupt warming in the central Mongolia Plateau”
- 5) A. Oba, W. Yan, M. Watanabe, T. Chuluun, B-E. Lhaamaa: ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS: Proceedings of IX International Conference (Ulan-Ude, Aug. 20-22. 2013)/eds. A.K. Tuloknonov, Y. Zh. Garmaev & A. S. Mikheeva. 2: 9-11 (2013)
“Modeling Livestock Dynamics for Evaluation of Carrying Capacity by using SIMSAGS in Bayan Sum of Tuv Aimag, Mongolia”
- 6) Q-X. WANG, M. Watanabe, BATKHISHIG O., T. Chuluun, OKADERA T., W. Yan., WU T-H., LIU J-Y: ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS: Proceedings of IX International Conference (Ulan-Ude, Aug. 20-22. 2013)/eds. A.K. Tuloknonov, Y. Zh. Garmaev & A. S. Mikheeva. 2, 26-29 (2013)
“A Policy Contribution-Oriented Research Project on Vulnerability Assessment and Adaptation Strategies for Permafrost Regions in Mongolia”
- 7) T-H. WU, ZHAO L., WANG Q-X., WU Q-B., LI R., BATKHISHIG O.: ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS: Proceedings of IX International Conference (Ulan-Ude, Aug. 20-22. 2013)/eds. A.K. Tuloknonov, Y. Zh. Garmaev & A. S. Mikheeva. 2: 63-67 (2013)
“Climate and Ground Temperature Relations at Three Discontinuous Permafrost Sites in Mongolian and Qinghai-Tibet Plateau”
- 8) T. OKADERA, Q-X. WANG, O. BATKHISHIG, M. Watanabe: ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS: Proceedings of IX International Conference (Ulan-Ude, Aug. 20-22. 2013)/eds. A.K. Tuloknonov, Y. Zh. Garmaev & A. S. Mikheeva. 2: 30-32 (2013)
“Water For Energy Production in Mongolia”
- 9) Z. SUN, Q-X. WANG, M. Watanabe, BATKHISHIG O.: ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS: Proceedings of IX International Conference (Ulan-Ude, Aug. 20-22. 2013)/eds. A.K. Tuloknonov, Y. Zh. Garmaev & A. S. Mikheeva. 1: 89-92 (2013)
“Investigation on relationship of climate change, grassland green-up and permafrost in Mongolian permafrost regions”
- 10) 渡邊正孝: 環境省広報誌「エコジン」, 02・03月号, 14 (2015)
「温暖化とゾド(寒雪害) —日本の協力で「適応策」を模索—」

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) A. Oba, M. Watanabe, T. Chuluun, L. Bolorderene, W. Yan, E. ZORIGT: Planet Under Pressure 2012. London, UK (2012)
“Carrying capacity management for adaptation and sustainability of pastoral social-ecological systems in Mongolia”
- 2) A. Oba, W. Yan, M. Watanabe, T. Chuluun, B-E. Lhaamaa: Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) 2012. Melbourne, Australia (2012)
“Design of Livestock Management Tool for Climate Change Risk in Mongolia”
- 3) A. Oba, W. Yan, M. Watanabe, T. Chuluun, B-E. Lhaamaa: The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Ulaanbaatar, Mongolia (2012)
“Vulnerability of Socio-Ecological Systems Caused by Extreme Weather in Mongolia”
- 4) A. Oba, W. Yan: 59th Annual Meeting of Ecological Society of Japan (ESJ59) and the 5th EAFES International Congress. Otsu, Japan (2012)
“Investigation of the Method for Evaluating Vulnerability of Socio-Ecological Systems in the Sum Scale of Mongolia”

- 5) A. Oba, W. Yan: EI Symposium 2012. Yokohama, Japan (2012)
“Framework of Support Systems to Bridge the Gap between Policy and Practice for Early Adaptation to Extreme Weather in Mongolia”
- 6) A. Oba, W. Yan: ISAP2012 International Forum for Sustainable Asia and the Pacific. Yokohama, Japan (2012)
“Modeling Grazing System in Bayan Sum of Tuv Aimag, Mongolia”
- 7) C. LIU, Q-X. WANG AND T. YASUNARI: The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Ulaanbaatar, Mongolia (2012)
“Impact of Human Activities on Regional Nitrogen Balance in East Asia”
- 8) O. BATKHISHIG AND Q-X. WANG: The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Ulaanbaatar, Mongolia (2012)
“Climate Change and its Impact on Soil Degradation in Mongolia”
- 9) Q-X. WANG, M. Watanabe, J-Y. LIU, O. BATKHISHIG AND Y. YANG, YMP 16 – Ecological Consequences of Multiple Changes in Asia and Their Implications to Global Sustainability in ESA 97th Annual Meeting, Portland, Oregon, USA (2012)
“Dynamics of terrestrial ecological indicators in East Asia during last decades”
- 10) Q-X. WANG, M. Watanabe, O. BATKHISHIG, T-H. WU AND J-Y. LIU: The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Ulaanbaatar, Mongolia (2012)
“Detecting Permafrost Degradation and Ecosystem Vulnerability in Mongolia using an Early Warning Monitoring Network”
- 11) T-H. WU, Q-X. WANG, L. ZHAO, R. LI, C. XIE, Q. PANG, O. BATKHISHIG and B. DORJGOTOV: 10th International Conference on Permafrost. Salekhard, Russia (2012)
“Permafrost degradation under abrupt warming in the central Mongolia Plateau”
- 12) A. Oba, W. Yan, B. Suvdantsetseg, M. Watanabe, T. Chuluun: Lkhamsuren Bolar-Erdane, AAG Annual Meeting. Los Angeles, Apr. 10, (2013)
“Development of the System for Early Adaptation to Climate Change in Mongolia”
- 13) A. Oba, W. Yan, B. Suvdantsetseg, M. Watanabe, T. Chuluun: 6th International Workshop on Remote Sensing and Environmental Innovations. Ulaanbaatar, Jun. 10 (2013)
“Development of Early Adaptation Systems for Local Communities”
- 14) A. Oba, W. Yan, B. Suvdantsetseg, M. Watanabe, T. Chuluun: The 14th Conference of the International Association for the Study of the Commons. Kita Fuji, Japan. Jun. 3-7 (2013)
“Development of a System for Early Adaptation to Climate Change in Mongolia”
- 15) M. Watanabe: Side Event Networking for Adaptation Knowledge & Action in Asia-Pacific, By Asia Pacific Adaptation Network at UNFCCC COP19. Warsaw, Poland, 18 Nov. (2013)
“Pathways toward Climate Compatible Development”
- 16) Q-X. WANG, M. Watanabe, BATKHISHIG O., T. Chuluun, OKADERA T., W. Yan., WU T-H., LIU J-Y: Proceedings of the 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia. Aug. 20-22, (2013)
“A Policy Contribution-Oriented Research Project on Vulnerability Assessment and Adaptation Strategies for Permafrost Regions in Mongolia”
- 17) T-H. WU, ZHAO L., Q-X. WANG, WU Q-B., LI R., BATKHISHIG O.: Proceedings of the 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia. Aug. 20-22, (2013)
“Climate and Ground Temperature Relations at Three Discontinuous Permafrost Sites in Mongolian and Qinghai-Tibet Plateau”
- 18) Z. SUN, Q-X. WANG, M. Watanabe, BATKHISHIG O.: Proceedings of the 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia. Aug. 20-22, (2013)
“Investigation on relationship of climate change, grassland green-up and permafrost in

Mongolian permafrost regions”

- 19) 岡寺智大, 王勤学, O. BATKHISHIG, 渡邊正孝: 日本地域学会 第50回 (2013年) 年次大会, 同学術発表論文集 (2013)
「モンゴルのエネルギー供給による水需要に関する研究」
- 20) B. Suvdantsetseg, A. Oba, W. Yan: The 5th Environmental Innovators (EI) Symposium, Yokohama, Japan. Jan. 15, (2014)
“Adaptation System Development with Science, Policy and Community Interfaces for Pastoral Resilience”
- 21) B. Suvdantsetseg, A. Oba, W. Yan: The 5th Environmental Innovators (EI) Symposium, Session 2: Embracing Change, Building Resilience with Communities. Yokohama, Japan. Jan.15-16 (2014)
“Climate Change Adaptation System Development with Science, Policy and Community Interfaces for Pastoral Resilience”
- 22) Okadera T., Wang Q-X., Batkhishig O.: 4th Asian Conference on Sustainability Energy and the Environment 2014, Osaka, Japan, (2014)
“Water for coal production in Mongolia”
- 23) Q-X. WANG, Okadera T. M. Watanabe, Yan W-L.: The 4th Asia-Pacific Climate Change Adaptation Forum. Kuala Lumpur, Malaysia, (2014)
“Environmental Vulnerabilities and their Adaptation Strategies in Mongolia”
- 24) Q-X. WANG, W. Yan, M. Watanabe, O. Batkhishig, D. Dorjgotov: The 5th Environmental Innovators (EI) Symposium, Session 2: Embracing Change, Building Resilience with Communities. Yokohama, Japan. Jan.15-16 (2014)
“Land Degradation and Carbon Fixation Reduction in Permafrost Region of Mongolia”
- 25) Q-X. WANG., Xiao Q-A., Okadera T. M. Watanabe, Batkhishig O.: IARU Sustainability Science Congress 2014, Copenhagen, Denmark, (2014)
“Vulnerabilities caused by Climate Change and their Adaptation Strategies in Mongolia”
- 26) Q-X. WANG: BIT’s 4th Low Carbon Earth Summit-2014. Qingdao, China, (2014)
“Environmental Vulnerabilities caused by Climate Change and their Adaptation Strategies in Mongolia”
- 27) Q-X. WANG: BIT’s 4th Annual New Energy Forum-2014. Sep. 21-23, 2014. Qingdao, China, (2014)
“Renewable Energy Technologies for Climate Change Adaptation-A Case Study in the Permafrost Region of Mongolia”
- 28) エリデニ, ナチン, 小長谷有紀, 王勤学: 日本モンゴル学会 2014 年度秋季大会, 岡山, (2014)
「統計データから読み取るモンゴルの農畜産の変遷及びその地域特性」
- 29) 王勤学, 岡寺智大, 肖慶安, 孫志剛: 国立環境研究所 公開シンポジウム 2014「低炭素社会に向けてー温室効果ガス削減の取り組みと私たちの未来ー」, 東京と奈良, (2014)
「モンゴルの永久凍土の融解による水循環の変動及び炭素吸収量の関係解明」
- 30) 王勤学, 岡寺智大, 肖慶安, 孫志剛: 第 12 回環境研究シンポジウム 気候変動と科学技術～考えよう地球の未来!～, 東京, (2014)
「モンゴルの永久凍土の融解による水循環の変動及び炭素吸収量の関係解明」
- 31) 岡寺智大: 第 28 回環境情報科学学術研究論文発表会, 東京, (2014)
「モンゴルの電力供給と水需要」
- 32) A. Oba: Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia Workshop, Tokyo, Japan, January 13-15, (2015)
“GWR Modeling for Zud Impact on Livestock”
- 33) M. Watanabe: Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia Workshop, Tokyo, Japan, January 13-15, (2015)
“Permafrost Melting as Critical Slow Variable for Gradual Drying in the Tuul River Basin”
- 34) Okadera T.: International workshop on Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia, Tokyo, Japan, (2015)
“Water for energy production in Mongolia”
- 35) Q-X. WANG., Xiao Q-A., Eer Deni, Okadera T. M. Watanabe, Batkhishig O.: International workshop on Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia, Tokyo, Japan,

(2015)

“CO2 Sequestration by Rangeland in Mongolia”

36) S. Takeda and M. Watanabe: Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia Workshop, Tokyo, Japan, January 13-15, (2015)

“Computable General Equilibrium Model for Economical Evaluation of Zud Event”

37) W. Yan: Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia Workshop, Tokyo, Japan, January 13-15, (2015)

“Planning and Building the Adaptive Network for the Production and Distribution of Livestock and Meat in Mongolia”

7. 研究者略歴

課題代表者： 王 勤学

北海道大学地球環境科学研究科卒業、博士、現在、独立行政法人国立環境研究所/地域環境研究センター 主席研究員

研究分担者

サブテーマ1 早期観測ネットワークによる永久凍土融解の検出及び脆弱性評価

- 1) 王 勤学 北海道大学地球環境科学研究科卒業、博士、現在、独立行政法人国立環境研究所/地域環境研究センター/主席研究員
- 2) 岡寺智大 大阪大学大学院工学研究科卒業、博士、現在、独立行政法人国立環境研究所/地域環境研究センター/主任研究員

サブテーマ2 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発と適応策の提言

- 1) 巖 網林 東京大学工学部土木工学科卒業、博士、現在、慶應義塾大学/環境情報学部/教授
- 2) 渡邊正孝 マサチューセッツ工科大学土木・環境工学科卒業、博士、国立公害研究所、独立行政法人国立環境研究所、慶應義塾大学環境情報学部教授、現在、慶應義塾大学大学院/政策・メディア研究科/特任教授
- 3) 丹治三則 大阪大学工学系研究科卒業、博士、現在、慶應義塾大学/環境情報学部/専任講師
- 4) 大場章弘 慶應義塾大学環境情報学部卒業、修士、現在、慶應義塾大学大学院/政策・メディア研究科/特任助教

2E-1203 モンゴルの永久凍土地帯における脆弱性評価及び適応策の提言に関する研究

(1) 早期観測ネットワークによる永久凍土融解の検出及び脆弱性評価

独立行政法人国立環境研究所

地域環境研究センター 王勤学・岡寺智大

平成24(開始年度)～26年度累計予算額：61,883千円（うち、平成26年度予算額：19,579千円）
予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

モンゴルの年平均気温は1940年以来2.1℃上昇した。温暖化に伴う永久凍土の融解は、水資源の減少、草原の砂漠化などをもたらし、牧草生産力や環境容量（家畜収容力）に様々な影響を及ぼすと考えられる。本研究では、早期観測ネットワークによる衛星・地上観測データを用いて、モンゴルの永久凍土の分布動態及びそれに伴う陸域生態系の脆弱性を評価した。まず、MODIS衛星による地表面温度データを用いて、1kmメッシュの最新（2000年代）の永久凍土分布図を作成した。それに基づいて、今世紀末（2090年代）の気温平均値が最大4.1℃上昇した場合（IPCC AR5のRCP8.5シナリオ）の予測図も作成した。これにより、今世紀末までに連続・不連続的な永久凍土が僅かしか残らず、特に点状的・島状的な永久凍土地域の面積は現在の1/5程度に縮小すると予測される。次に、凍土融解と牧草フェノロジー及び生産量の関係を明らかにした。その結果、北部の連続・不連続的な永久凍土地帯では、牧草の生育期に気温と降水量の影響が小さいため、生産量が高く、安定的に提供できる。一方で、南部の点状的永久凍土、特に季節的凍土地帯では、牧草の生育期に双方からの影響が大きいため、生産量が低く、変動が激しいことが分かった。さらに、推定された牧草生産量を基に、地形、土地利用、草原の種類及び家畜の摂取量等の要因を考慮し、牧草地の環境容量を推定した。現状のソムレベルの放牧頭数と比較することによって放牧圧の地域分布を明らかにした。その結果、中央部、特に首都のウランバートル市周辺地域では、放牧量が収容力を大きく超え、過放牧であることが定量的に判明した。最後に、水・熱シミュレーション（SHAW）モデルを用いて、干ばつ、放牧強度と永久凍土の融解との関係を解明するための数値実験を行った。その結果、Nalaikh実験サイトでは、年降水量が331.4mmを下回った場合、永久凍土の活動層から水分の損失が発生する。さらに、干ばつと過放牧が同時に起きた場合、永久凍土は一層脆弱になることが分かった。

[キーワード]

気候変動、永久凍土、牧草生産量、環境容量、脆弱性評価

1. はじめに

モンゴルの永久凍土地域は、シベリア永久凍土区的最南端にあり、モンゴル国土の63%を占めている。凍結融解作用によって形成された永久凍土は、陸域生態系における植生の成長と生産に重要な役割を果たしている。低温な永久凍土は根の深部への成長を制限し、土壌層における有機物

質が蓄積し易い。また、永久凍土の活動層の底は、不透水層や半透水層と見なされ、地表水と土壤水分の浸透と下向きの移動を防ぐことができる。そして、表土から浸透した土壤養分は活動層の底部に蓄積する傾向がある。そのため、永久凍土は植生に土壤水分と栄養を供給するという重要な役割を果たしている。一方、日射を遮蔽する植生は、表土の温度と蒸散速度を抑え、冷却効果を促す。また、植生は土壤水の保持、気候調節、浸食防止、土砂の固定、そして植生と土壤間の水のバランスを保つ。こうして、永久凍土と植生は、相互に補完し合い寒冷地域の生態系バランスを維持する意味ではとても重要である。

永久凍土の融解は土壤の水・熱収支過程を変化させ、その結果、種組成を変化させ、群落遷移と生態系の劣化を引き起こす。氷を多く含む凍土が分布する平原上の低地にある群落にとって永久凍土の融解は、乾燥しがちな生息環境の湿潤化をもたらす。永久凍土の融解に伴って土壤水分が増加し、乾生植物は湿生植物に置き換わってしまう。一方で、乾燥した永久凍土の融解が土壤排水の改善につながる場合、土壤の乾燥化が進み、乾生植物の分布が緩やかに拡大させる。また、永久凍土の融解は土壤透水性に変化をもたらす。土壤水分は植生分布、植物の成長、群落の構造と機能を制限する重要な生態学的要因であるため、土壤透水性は最終的に植生被覆率に影響する。一般的に、永久凍土の活動層の厚さ（ALT）が2m未満の場合、土壤水分含量及び植生被覆率は高く、2mを超えると、ほとんどの植物の成長は制限され、発達した根系をもつ干ばつに強い少数の種だけが低被覆率で生存する。こうして、永久凍土の融解により土壤水分が調整されることで、種組成や多様性に影響を及ぼす。

モンゴルの年平均気温は1940年以来2.1℃上昇しており、同時に永久凍土の融解が観測されている。温暖化に伴う永久凍土の融解は、水資源の減少、草原の砂漠化などをもたらす。牧草生産力や環境容量（家畜収容力）に様々な影響を及ぼすと考えられる。既存の研究では、気候変動と永久凍土の融解や経済活動と過放牧の関係が明らかにされたものの、永久凍土の融解による水循環の変動と牧草・牧畜量との関係が解明されていない。そのため、科学的なデータに基づき、永久凍土地域における気候変動や開発活動の影響評価を行い、地域の脆弱性を診断した上で、頑強な適応策を打ち出し、早急な策定が求められている。

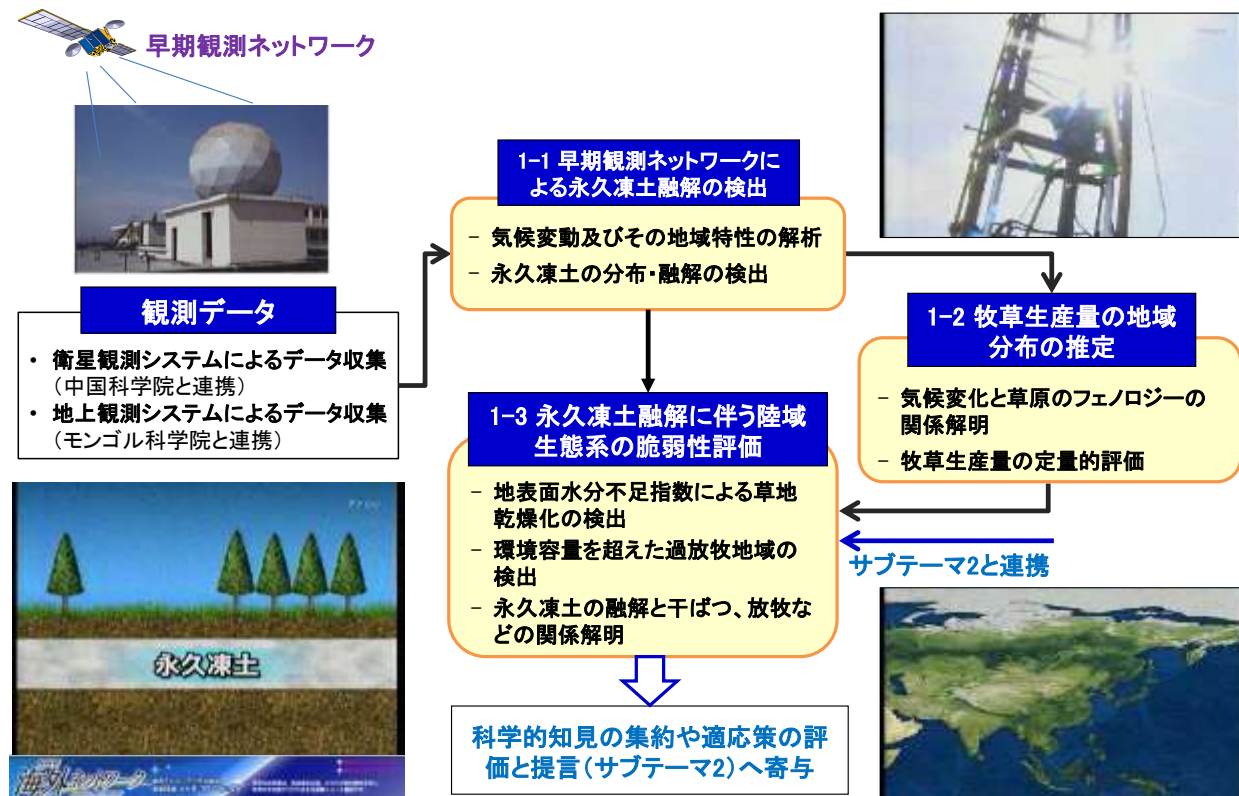
2. 研究開発目的

本研究の目的として、早期観測ネットワークによる衛星・地上観測データを用いて、モンゴルの永久凍土の融解及びそれに伴う陸域生態系の脆弱性を明らかにする。具体的には、まず、広域の地表面温度や植生指数等の衛星データを用いて永久凍土の分布動態を把握する。その次に、気象要因、植生被覆及び蒸発散量などの広域データを用いて、草地生産量の分布動態を推定する。さらに、陸域生態系の脆弱性評価モデルの開発と検討を行い、永久凍土融解に伴う水資源の枯渇、草原の乾燥化及び生産量の低下等の陸域生態系の脆弱性を明らかにする。

3. 研究開発方法

早期観測ネットワークによる広域の地表面温度や植生指数等の衛星高次処理データを用いて、永久凍土の分布状況を把握する。また、広域な気象要因、植生被覆及び蒸発散量などのデータを生態系モデルに入力することで、草地生態系の一次生産量の地域分布を推定する。これらの推定結果を検証するため、長期モニタリングの実施や現地調査と測定によるデータ収集を行う。さら

に、検証された草原地域の現状生産量と推定された環境容量をオーバーレイすることによって、永久凍土融解に伴う水資源の枯渇、草原の乾燥化及び生産量の低下等の陸域生態系の脆弱性を明らかにする。具体的な研究手法と手順は図(1)-1で示す。



図(1)-1 サブテーマ(1)の研究手法と手順

4. 結果及び考察

気候変動の影響は、生態系、水資源、積雪、永久凍土層へ深刻な影響をもたらすと推測している。UNDPの人間開発報告書によると、気候変動には人間の開発に影響を与える5つの主要なメカニズムがあるという：農業生産と食料安全保障、水ストレスと水の安全保障、海面上昇や気候災害、生態系と生物多様性、そしてヒトの健康である（UNDP、2007）¹⁾。本研究では、気候変動に伴う永久凍土の分布・融解、気候変動に伴う地表面の水分不足や草原の乾燥化、及び牧草・牧畜生産量の低下など陸域生態系の脆弱性への影響について解析した。

(1) 永久凍土の分布・融解の検出

1) 気候変動及びその地域特性の解析

20世紀に、地球の表面温度は平均して約0.74℃(IPCC、2007)²⁾上昇したが、モンゴルの年平均気温の上昇はそれよりはるかに大きい。1940年以降の40地点の観測データの解析から、モンゴルの気候は下記のように著しく変化したことが分かった。

- 1940年以降の70年間、モンゴルの年平均気温は約2.1℃上昇した。そのうち、冬季の平均気温が3.6℃上昇し、最も顕著であり、春季、夏季、秋季ではそれぞれ1.8℃、1.3℃、0.5℃

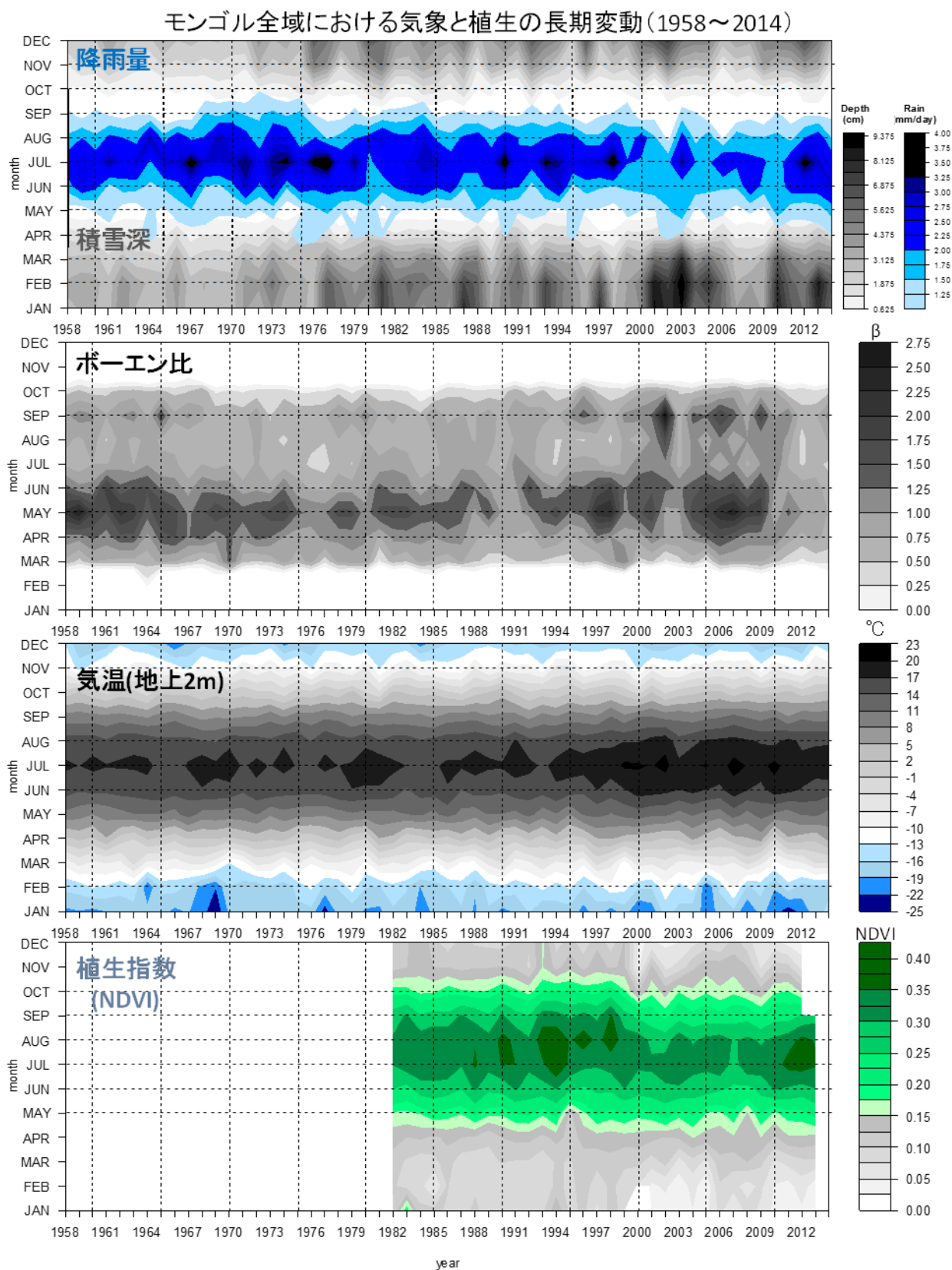
ずつの上昇が見られた。気温上昇の地域分布は、北部の草原と森林地帯では、年平均温度 0℃以下であり、温度の上昇率は約 0.37℃/10 年であり、中央部と南部の砂漠と砂漠ステップ地帯では、年平均温度 0℃以上であり、温度上昇率は 0.38-0.59℃/10 年であった。そのうち、一部の地域（例えば西部と中央部の砂漠ステップ地帯）では上昇率が 0.53-0.59℃/10 年にも達した。

- ・ 地理にもよるが、熱波の発生日数は 8-18 日増加した。最も増加したのはハンホヒー山脈地域とハンガイ山脈の西部（15-18 日）であり、アルタイやヘンティエー山脈地域では 10-12 日、ゴビ砂漠では 6-8 日であった。一方、寒波の発生日数は 13-15 日短縮された。最も減少したのは、ハンガイ山脈地域（最大 20 日間の減少）であり、ゴビ砂漠地域ではそれより短くなっている。
- ・ 年降水量の変化は、時期や場所によってばらつきが見られた。季節的には、秋季と冬季の降水量には 4-9%の上昇がみられ、一方春季と夏季降水量には 7.5-10%減少が認められた。空間的には、中央部では年間降水量の 30-90 mmの減少がみられ、西部の大部分では 2-60 mm、南東部の大部分では 30-70 mmの上昇がみられ、変化幅は約 5-25%であった。年間降水量が減少したモンゴル中央部では、連続乾燥日の最大値が上昇した。一方、年間降水量が増加したモンゴル南東部では連続乾燥日の日数が減少した。
- ・ 上述のように、温度上昇と降水量の減少に従い、蒸発散量は 7-12%程度で増大した。

また、本研究では、気象庁及び電力中央研究所による JRA-55 及び Global Precipitation Climatology Centre monthly precipitation dataset (GPCP) の再解析気象データ（1958～2014年）を用いて、モンゴル全土における気候要素の長期的な変動を解析した。この JRA-55 再解析データは、気象庁が 1.25 度等緯度経度格子データとして 1958～2014 年までの長期の再解析データを公開したものである。このデータを用いることによって、モンゴル国では観測データの少ない積雪量や気象フラックスデータの不十分性から今までに議論できなかった長期の気候変動を示すことができた。また、NOAA/AVHRR 及び Terra/MODIS など衛星観測による植生指数時系列データセットを用いて、植生生産性の長期的な変動を解析した。その結果を図(1)～2に示した。その結果：

- ・ 降雨量と積雪量： 1990 年初期より降水量の低下が続いており、一方で降雪量の増加現象が続いており、特に 2001-2004 年、2010-2011 年においては、積雪量が過去に比較して最も規模の大きいことが示された。
- ・ 気温の変動： 気温は 1990 年代により上昇傾向を示しており、特に夏季における気温上昇と季節性の変化が見られた。
- ・ 乾燥化： ボーエン比の長期変化から、乾燥化が進み、特に春季から秋季までの長期化傾向が示された。
- ・ 植生の変動： 1990 年初期より植生が最も旺盛である夏季において、減少傾向であり、草地植生の劣化が示唆された。

上述した衛星データと再解析データの解析から、2000～2002年及び2010年の自然災害（ゾド）の発生は、2000年以降における大規模な積雪と干ばつの影響が大きかったことが示唆された。

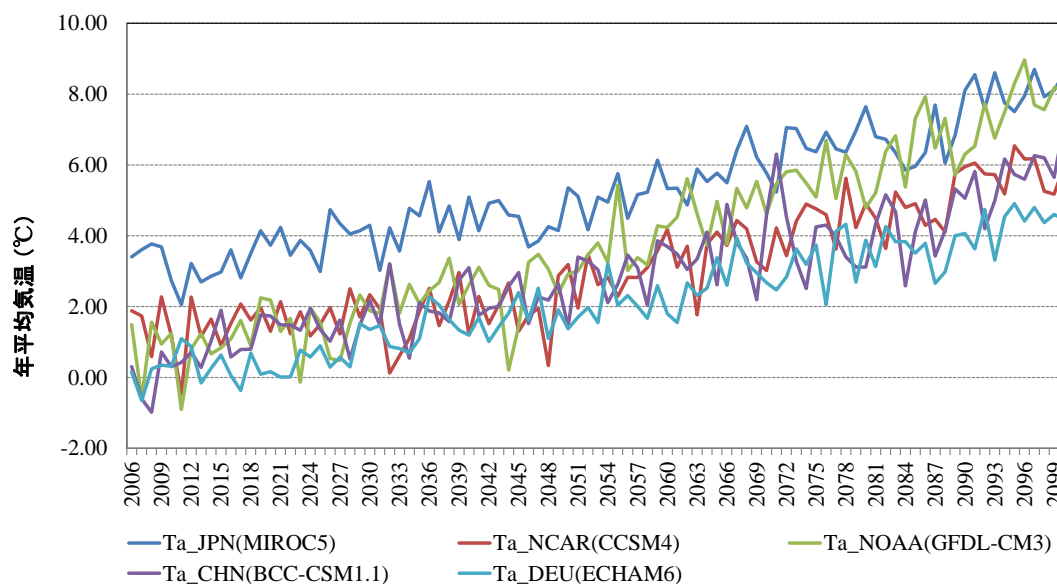


図(1) - 2 JRA-55及びGPCCの再解析気象データ (1958~2014年) による気候要素及び NOAA/AVHRR及びTerra/MODIS衛星観測データによる植生指数の長期的な変動

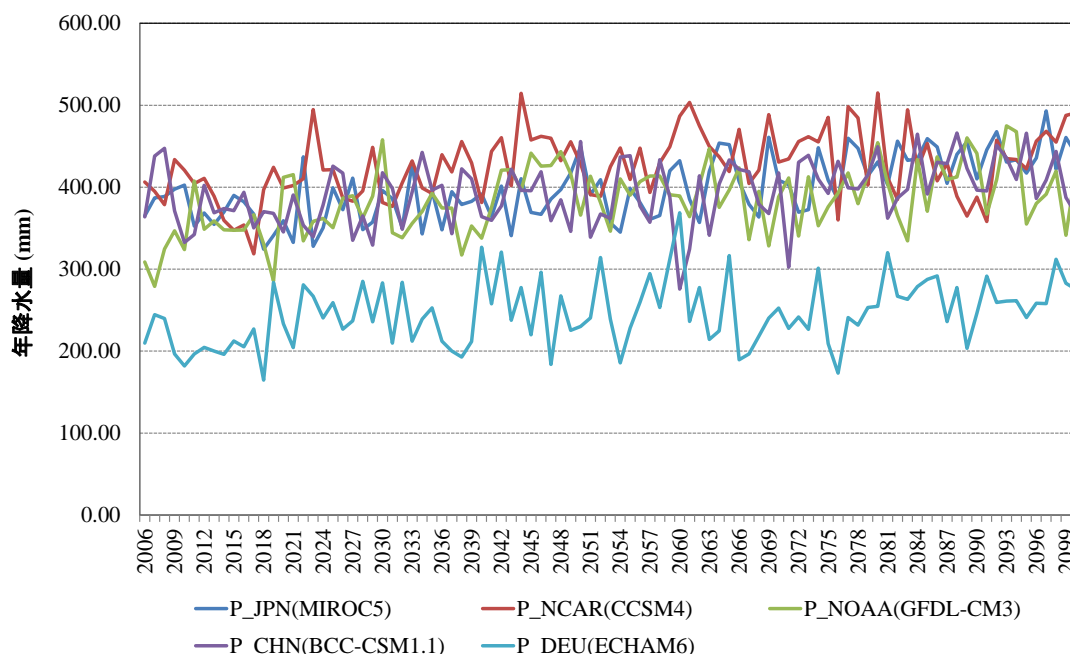
また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書（AR5）（IPCC，2013）³⁾に関連する5つの全球気候モデル（GCM）モデル（日本のMIROC-ESM、米国のNCAR-CCSM4とNOAA-GFDL-CM3、中国のBCC-CSM1.1及びドイツのMPI-M-ECHAM6）の予測結果（<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/availability.html>）によると、2006年から2100年まで温室効果ガスの排出が続けば、温暖化がさらに進行し、極端な気候現象（干ばつ、雪害、洪水や熱波など）がさらに強まる可能性を示されている。

IPCCのAR5に向けて、新たな気候変動予測シナリオが開発された。このシナリオは代表的濃度パス（RCP）と呼ばれ、4つの温室効果ガス濃度に対応した排出シナリオであり、より詳細な空間解像度を持つデータが気候モデルグループに提供され、気候変動研究に使われている。この4つのシナリオは、大気中の温室効果ガス濃度が放射強制力の上昇に与える影響の大きさをもとに特徴づけられており、それぞれRCP8.5、RCP6.0、RCP4.5、RCP2.6と呼ばれている。これらのシナリオは、工業化以前と比較して放射強制力が今世紀末にそれぞれ 8.5W/m^2 、 6.0W/m^2 、 4.5W/m^2 、 2.6W/m^2 上昇するというシナリオに対応している。

図(1)－3と図(1)－4は、IPCC AR5にて考案されたRCP8.5シナリオに従い、5つのCMIP5モデルによって予測されたモンゴルの年平均気温（Ta）と年降水量（P）の長期的変動（2006-2100）の予測値である。その結果、継続的な温度の上昇と降水量の緩やかな増加傾向が読み取れる。また、気温と降水量の変動幅が増加し、将来的に極端な気候現象（干ばつ、雪害、洪水や熱波の持続期間）がさらに強まる可能性を示しており、将来モンゴルにおける気候システムがさらなる不安定な変動傾向を意味し、気温と降水量の変動による影響の将来予測結果の大きな特徴として言える。



図(1)－3 IPCC AR5にて考案されたRCP8.5シナリオに従い、5つのCMIP5モデルによって予測されたモンゴルの年平均気温（Ta）の長期的変動（2006-2100）



図(1)－4 IPCC AR5にて考案されたRCP8.5シナリオに従い、5つのCMIP5モデルによって予測されたモンゴルの年降水量（P）の長期的変動（2006-2100）

モデル予測の結果によると、夏季においては中央モンゴルの山岳地帯における降水量は、40-60mmの増加傾向が見られた。また、秋季においてはモンゴル北部で0-20mm、南部で20-40mmの増加、春季には中部と西部で0-20mm、北部で20-40mmの増加傾向が見られ、春季から秋季において、全体的に降水量の増加傾向が示唆された。一方で、冬季においては国土全体で0-20mmの減少傾向が見られた。総じて、モンゴル中、西部では著しい気温上昇が発生し、従って中部では降水量の減少、東部では降水量の増加が予測される。これらの予測結果を踏まえるとモンゴル全体において、暖候期（春季～秋季）の気温上昇が蒸発散量の増加を引き起こし、将来においても干ばつが起こる可能性が示唆された。年間降水量は若干の増加が予測されているものの、乾燥など負の変化が植生と半砂漠帯の北上を引き起こすと予想される。

2) 永久凍土の分布・融解の検出

永久凍土は、2年以上連続して0℃以下を保つ地層として定義される。それは地域の地理的条件、地質構造、土壌の性質、水文学、地形の特徴といった様々な影響のもと、大気・土壌間の物質やエネルギーの交換によってもたらされた地質学的実体であり、特に気候・水文環境の変化に対して敏感である。永久凍土は北極圏と北半球の寒帯地域に分布しており、地表面積の25%を占めている。永久凍土は、北極海の大陸棚上と山岳地域に存在し、ロシア、カナダ、中国、アラスカ、そして高山や亜高山には、広範囲において分布している。永久凍土は気温によって厚さや状態、地理的範囲が決まり、気温の変化に敏感であるため、雪氷圏における地球規模の気候変動の重要な指標とされている。IPCCの第3次報告(IPCC, 2007)²⁾によると、全球の平均地表面温度は過去100年間で約0.74 ± 0.18℃上昇している。将来において高緯度で最も高い温度上昇が起きると予想さ

れている。気候予測に多くの不確実性があるものの、温暖化が高緯度帯の永久凍土に深刻な影響を与える点では、モデルの結果が概ね一致している。地域的な気温上昇は永久凍土の広域な劣化、融解層の深さの増加、そして局所の永久凍土の消失を引き起こし、これは特に点在する不連続永久凍土帯において顕著である。永久凍土の融解は、水文過程、植生の分布、土壌有機炭素、そしてインフラや経済にも大きな変化を与えると考えられる。

モンゴルの永久凍土地域は、北半球の寒帯地域の最南端に分布しているため、気候変動に最も敏感に反応する位置にある。これまでの観測によると、1970年代以降、モンゴルの永久凍土の温度は 0.05°C - 0.15°C 上昇した。同時に、季節的な凍土の厚さは過去30年間で $10-20\text{cm}$ 減少した。モンゴル科学院が測定した16地点のボーリング孔の1996年以降の地温プロファイル (MAGT) 及び活動層の深さ (ALT) のデータからもその変化を解析した。これらのデータは、極地活動層モニタリング (CALM) 及び全球陸域永久凍土ネットワーク (GTN-P) から提供されている。16のボーリング孔のうち、MAGT及びALTが同時に連続的に測定した8孔を解析した結果、1996年から2007年までの10年間にM1を除いた7ボーリング孔のMAGTは平均で $0.020^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ($P < 0.05$) 上昇し、同時に、ALTは $7.3\text{cm}/\text{年}$ の速度で増加していたことが分かった。

永久凍土は、気象条件以外に、植生の影響、地質構造や土壌の熱伝導率にも関係しているが、長期的に見れば、永久凍土の分布は気温の積算温度との関係が最も大きい。そのため、凍土の分類には、様々なインデックスが定義された。その中、Nelsonら (1986, 1987) ⁴⁾⁻⁵⁾が開発した永久凍土インデックス (PMI) が、凍土分布の推定に最も一般的に使われているインデックスである。

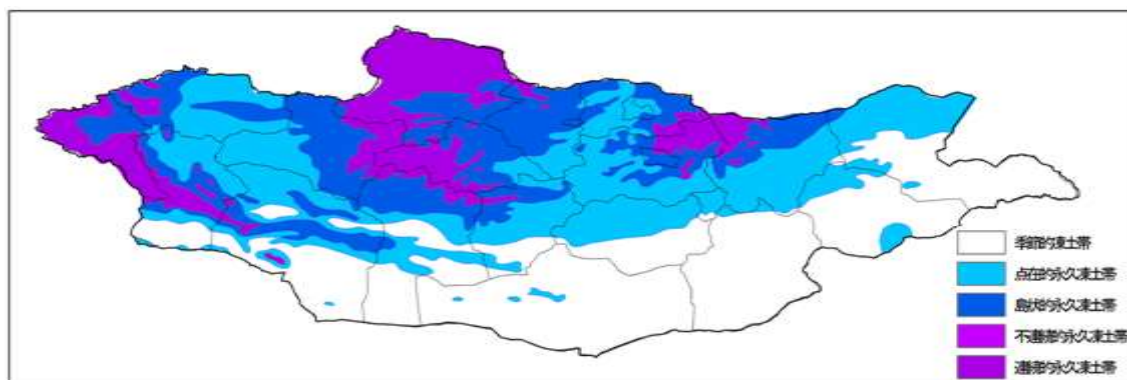
$$\text{PMI} = (T^-)^{1/2} / ((T^-)^{1/2} + (T^+)^{1/2}) \quad (1)$$

ここで、 T^+ と T^- はそれぞれ融解指数と凍結指数であり、つまり、 T^+ は 0°C 以上の積算温度で、 T^- は 0°C 以下の積算温度である。積算温度とは、ある期間の日々の平均温度のうち、一定の基準値を超えた分を取り出し合計したものである。一般的には、植物の生長に必要な熱量の大小の目安によく用いられているが、永久凍土の融解と凍結の指標としても使われている。例えば、 0°C 以上になると、永久凍土が融解過程へ、 0°C 以下は凍結過程へ、その地理的な分布も永久凍土の分布を左右していると考えられる。そのため、 0°C 以上の積算温度は融解指数 (T^+) で、 0°C 以下の積算温度は凍結指数 (T^-) と定義されている。

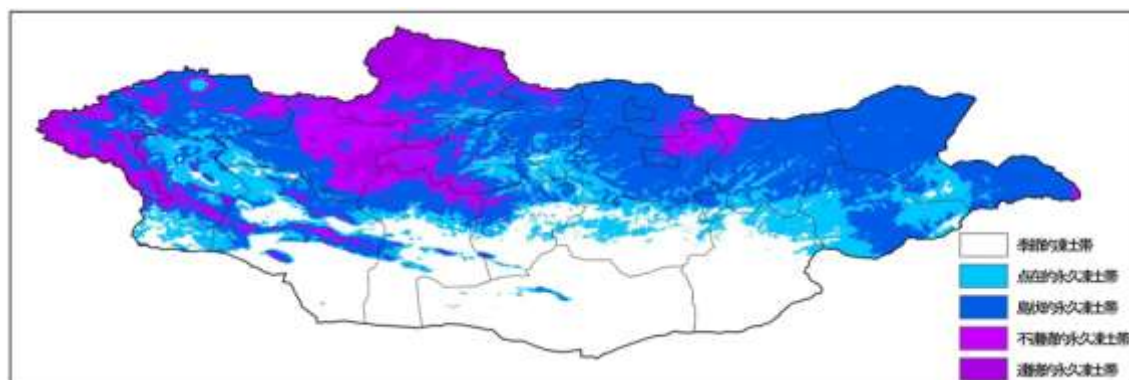
既存の研究 (Nelsonら、1986, 1987) ⁴⁾⁻⁵⁾では、PMIの算定には気象観測サイトで観測された気温が使われていたが、観測サイトが過疎であるため、複雑な地形や、植生や土壌表層の特性などの影響が反映されない欠点がある。しかし、衛星観測による地表面温度データは、気温と比べて、植生の影響や土壌表層の特性の影響が反映されているため、永久凍土の分布と最も相関が高いと考えられる。そのため、本研究では、地球観測衛星Terra及びAquaに搭載されたMODIS衛星から推定されたMOD11A2プロダクト (2001-2012年) である地表面温度 (LST) の情報 (<https://lpdaac.usgs.gov/>) を用いて、従来の気象観測による数十キロメートルメッシュより遥かに精度の高い1キロメートルメッシュの融解指数と凍結指数及びPMIを算定し、既存の研究やモンゴル科学院地理研究所が2009年に出版されたモンゴル国家地図集⁶⁾に収録された1990年代の永久凍土分布図⁶⁾ (図(1)-5) と照らして、表(1)-1に示す評価基準で凍土地帯を分類し、2000年代の最新の永久凍土分布図 (図(1)-6) を作成した。

表(1)－1 凍土指数PMIによる凍土地帯の評価基準

PMI	凍土地帯の類型	Permafrost Zones
<0.40	季節的な凍土	Seasonal Frozen Zone
0.40-0.45	点状的な永久凍土	Sporadic Permafrost
0.45-0.50	島状的な永久凍土	Insular & Sparsely Insular Permafrost
0.50-0.60	不連続的な永久凍土	Discontinuous Permafrost
>0.60	連続的な永久凍土	Continuous Permafrost



図(1)－5 モンゴル科学院の1990年代の永久凍土分布図



図(1)－6 MODIS衛星データ（2000-2012年）を用いて推定した永久凍土指数（PMI）により作成した2000年代の高精度の永久凍土分布図

また、モンゴル全域の2001-2012年の年毎のPMIを用いて、12年間の変動指数CV (coefficient of variation) を推定し、平年と比べ著しく変動した地域を抽出した。変動係数CVとは、母集団の標準偏差sと平均値uとの比率（式2）と定義される。

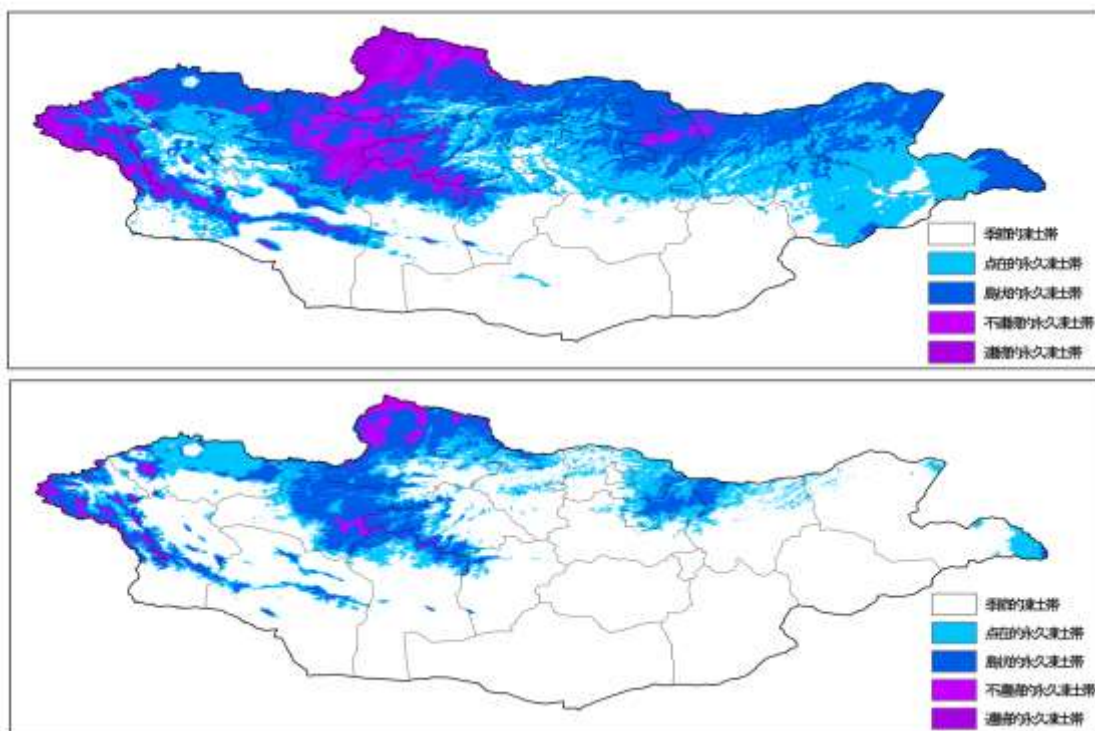
$$CV=s/u \quad (2)$$

12年間のPMI平均値とその変動指数CVを見ると、モンゴル北部のPMIが高く、連続・不連続的な永久凍土地帯と分類される。この地域では、PMIの変動指数CVがかなり小さい。その反面、モンゴル南部のPMIの平均値が低く、点状的な永久凍土地帯及び季節的な凍土地帯と分類される。この地域では、PMIの変動指数CVが大きい。これらの特徴から、モンゴル北部の連続・不連続的な永久凍土はとても安定的で変動が小さいが、南部の点状的な永久凍土地帯特に季節的な凍土はかなり不安定で変動しやすいということが示唆された。

さらに、本研究では、上述の五つのIPCC関連のCMIP5モデルのうち、現地の気温観測データと最も相関の高いドイツのMPI-M-ECHAM6の予測値を解析した。その結果を表(1)-2に示した。それによると、IPCC AR5のRCP4.5とRCP8.5の二つのシナリオにおいて、2090年代の平均気温は2000年代より永久凍土地域では、それぞれ最大1.3℃と4.1℃の上昇、季節凍土地域では、それぞれ最大1.4℃と4.1℃の上昇と予測された。そのため、本研究では2000年代の地表面温度分布の平均値に、MPI-M-ECHAM6が予測したそれぞれRCP4.5とRCP8.5の二つのシナリオでの温度上昇値を加算することで、2090年代の永久凍土分布の予測図を作成した(図(1)-7)。これによると、RCP8.5のシナリオでは、本世紀末までにモンゴル北部の海拔の高い山頂以外、連続・不連続的な永久凍土が僅かしか残らないとの結果が示された。特に点状的・島状的な永久凍土地域の面積は現在の1/5程度に縮小していくと予想される。

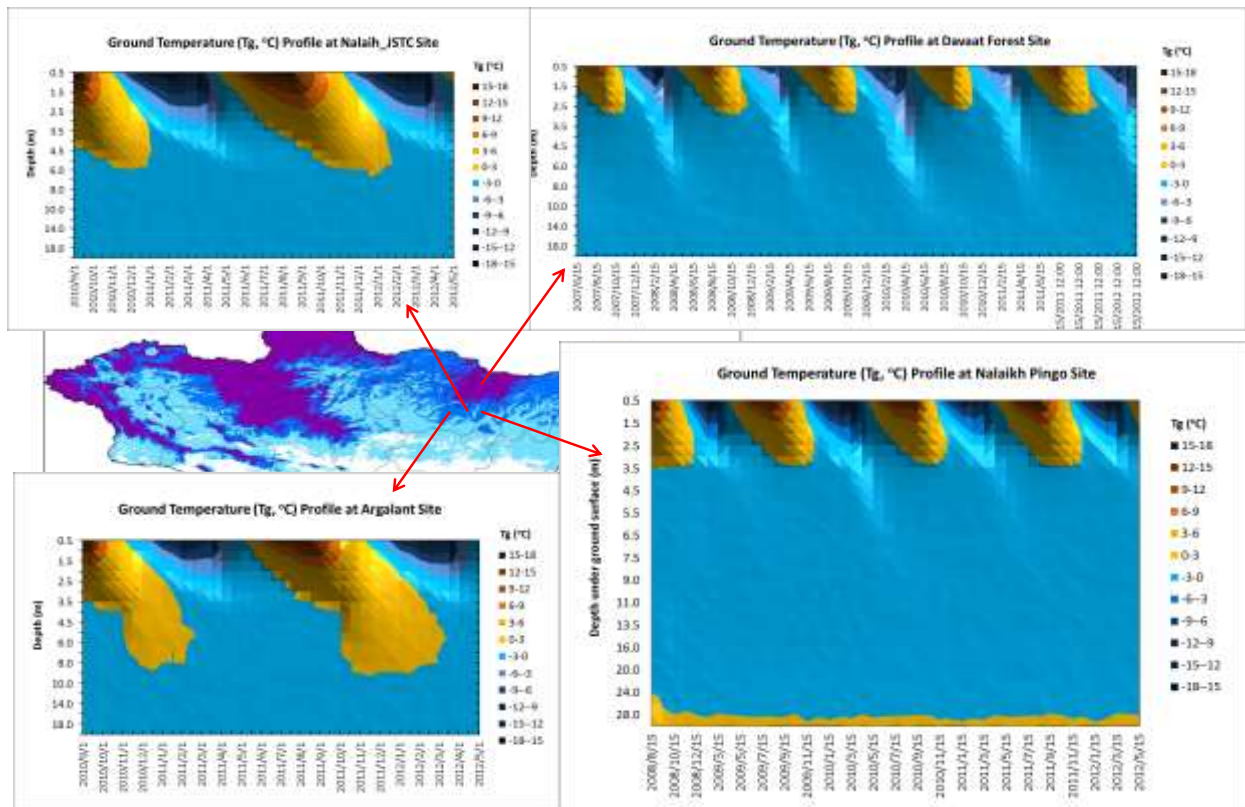
表(1)-2 モンゴルの永久凍土地域と季節凍土地域におけるIPCC AR5のシナリオ(RCP4.5とRCP8.5)でドイツのMPI-M-ECHAM6モデルによる気温再解析値と予測値

IPCC AR5 のシナリオ	永久凍土地域		季節凍土地域	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ΔT_a (2000s-1850s) °C	1.7	1.7	1.8	1.8
ΔT_a (2000s-1900s) °C	1.6	1.6	1.6	1.6
ΔT_a (2000s-1950s) °C	1.1	1.1	1.1	1.1
ΔT_a (2050s-2000s) °C	1.2	1.8	1.1	1.7
ΔT_a (2090s-2000s) °C	1.3	4.1	1.4	4.1



図(1)-7 IPCC AR5のRCP4.5(上)とRCP8.5(下)の二つのシナリオでの2090年代の永久凍土分布予測図

最後に、作成した永久凍土の分布図を検証するため、モンゴル国北部の5つの観測サイトで永久凍土プロファイルのモニタリングを実施した。その結果、連続的な永久凍土地域に分布しているDavaatサイトでは、永久凍土の深さは地下2.8mに存在し、不連続的な永久凍土地域に分布しているNalaikh JSTCサイトとNalaikh Pingoサイトは地下3.5-5mの間で、さらに、点状的な永久凍土地域に分布しているArgalantサイトでは、永久凍土の深さは地下8m以下であることが明らかとなり、大きな地域差が存在していることが初めて定量的に分かった（図(1)-8）。



図(1)-8 本研究によりモンゴル北部に設置している四つのモニタリングサイトで観測された永久凍土温度プロファイルの経年変化

(2) 牧草生産量の地域分布の推定

1) 気候変化と草原のフェノロジーの関係解明

モンゴルはユーラシア寒冷圏の南端に位置し、様々な種類の凍土に覆われている。このような地域においては、極端な乾燥及び寒冷な気候的条件にあるため、植生のフェノロジーが気候変動に対して敏感に反応している。これまでの既存研究^{7-9), 11)}によると、チベット高原や中国北部の乾燥地帯では、春季の牧草のフェノロジーは主に春の降水量によって左右されていることが明らかになっている。しかし、これらの研究対象地域は、主に季節凍土地帯に位置しているため、永久凍土地域における牧草のフェノロジーに影響を及ぼす凍土の役割については、これまでに報告がなされていない。また、モンゴルでの広範囲に渡る長期間の牧草のフェノロジーの記録が欠如しているため、上記の疑問は科学界及び関係者を混乱させ続けている。

本研究では、モンゴルの異なる凍土地帯における気候の経年変化に対する草原の生育期の開始時期(SOS)、つまりグリーンアップ時期と生育期の終了時期(EOS)など牧草のフェノロジーと気候

の経年変化との相互関係を明らかにし、さらに、その相互関係の中、凍土が果たした役割を定量的に解析した。使用したデータについて、まず、モンゴル国内の24ヶ所の気象観測所の過去10年間の気温と降水量データを用いた。これらの24ヶ所の気象観測所で観測された気温と降水量データは、アメリカ海洋大気局(NOAA)の国立気候データセンターから入手した(表(1)-3)。これらの気象観測所は3つの草原タイプに設けられている。北部の森林ステップ、南部及び西部地域の砂漠の境界に沿った砂漠ステップ、及び森林ステップと砂漠ステップの間にある典型的ステップにそれぞれ7ヶ所、10ヶ所と7ヶ所(表(1)-3)が設けられている。

また、この24ヶ所の気象観測所は、ANN-Ta 範囲 -1°C 未満の連続・不連続永久凍土(表(1)-3中に7ヶ所の気象観測所)、ANN-Ta 範囲 $0 \pm 1^{\circ}\text{C}$ の点位的永久凍土(11ヶ所の気象観測所)、ANN-Ta 範囲 1°C 以上の季節凍土(6ヶ所の気象観測所)の3つの凍土地帯に分布している。

表(1)-3 モンゴル国内24ヶ所の国立気象観測所の地理情報(ID、名称、緯度、経度、標高)、2000-2009年の年間平均気温(ANN-Ta)と標準偏差、年降水量(ANN-P)及び植生/凍土類型(FS: 森林ステップ、ST: ステップ、DS: 砂漠ステップ、OP: 季節凍土、1P: 点位的な永久凍土、2P: 連続・不連続的永久凍土)

草原/ 凍土 類型	気象 観測所 ID	気象観測所 名称	緯度 ($^{\circ}$)	経度 ($^{\circ}$)	標高 (m)	年平均気温 ANN-Ta ($^{\circ}\text{C}$)	年降水量ANN-P (mm/年)
FS/2P	442030	Rinchinlumbe	51.117	99.667	1583	-6.2 ± 0.8	273.8 ± 62.1
FS/2P	442070	Hatgal	50.433	100.150	1668	-3.6 ± 0.8	281.1 ± 80.3
FS/1P	442300	Tarialan	49.567	102.000	1235	0.5 ± 0.7	306.6 ± 65.7
FS/1P	442320	Hutag	49.383	102.700	938	0.3 ± 0.9	295.7 ± 54.8
FS/1P	442390	Bulgan	48.800	103.550	1208	-0.1 ± 0.7	270.1 ± 43.8
FS/1P	442410	Baruunharaa	48.917	106.067	807	0.4 ± 0.9	284.7 ± 91.3
FS/OP	442820	Tsetserleg	47.450	101.467	1691	1.7 ± 0.7	310.3 ± 54.8
ST/2P	442130	Baruunturuun	49.650	94.400	1232	-2.3 ± 1.0	211.7 ± 25.6
ST/2P	442250	Tosontsengel	48.733	98.200	1723	-5.0 ± 0.9	222.7 ± 84.0
ST/1P	442920	Ulaanbaatar	47.917	106.867	1306	-0.7 ± 0.7	251.9 ± 62.1
ST/1P	443020	Bayan-ovoo	47.783	112.117	926	0.9 ± 0.9	200.8 ± 40.2
ST/1P	443040	Underkhaan	47.317	110.633	1033	0.4 ± 0.9	219.0 ± 62.1
ST/1P	443130	Khalkh-gol	47.617	118.617	688	0.4 ± 0.8	270.1 ± 47.5
ST/OP	443140	Matad	47.167	115.633	907	2.1 ± 0.8	193.5 ± 76.7
DS/2P	442120	Ulaangom	49.800	92.083	939	-1.9 ± 1.0	135.1 ± 40.1
DS/2P	442750	Bayanbulag	46.833	98.083	2255	-3.1 ± 0.9	127.8 ± 58.4
DS/2P	442840	Galut	46.700	100.133	2126	-3.3 ± 1.1	142.4 ± 32.9
DS/1P	442150	Omno-gobi	49.017	91.717	1590	-0.3 ± 1.1	131.4 ± 51.1
DS/1P	442770	Altai	46.400	96.250	2181	-0.4 ± 0.8	157.0 ± 51.1
DS/1P	442870	Bayanhongor	46.133	100.683	1859	0.9 ± 0.7	175.2 ± 73.0
DS/OP	442980	Choir	46.450	108.217	1286	1.9 ± 0.8	153.3 ± 87.6
DS/OP	443360	Saikhan-ovoo	45.450	103.900	1316	3.3 ± 0.8	113.2 ± 51.1
DS/OP	443520	Bayandelger	45.733	112.367	1101	3.0 ± 0.8	160.6 ± 69.4
DS/OP	443580	Zamyn-uud	43.733	111.900	964	5.1 ± 0.7	135.1 ± 29.2

本研究においては、新たに 3 ヶ所の自動気象観測システム(AWS)を、ウランバートル近郊の Nalaikh サイト(典型的ステップ)及び Davaat 観測サイト(典型的ステップ及び森林ステップ)で設置した。AWS では、凍土温度のプロファイルと同様に、気温、湿度、風速、風向、降水量、地表温度、土壌温度及び水分量及び日射、純放射などを 30 分間隔で観測データを取得した。

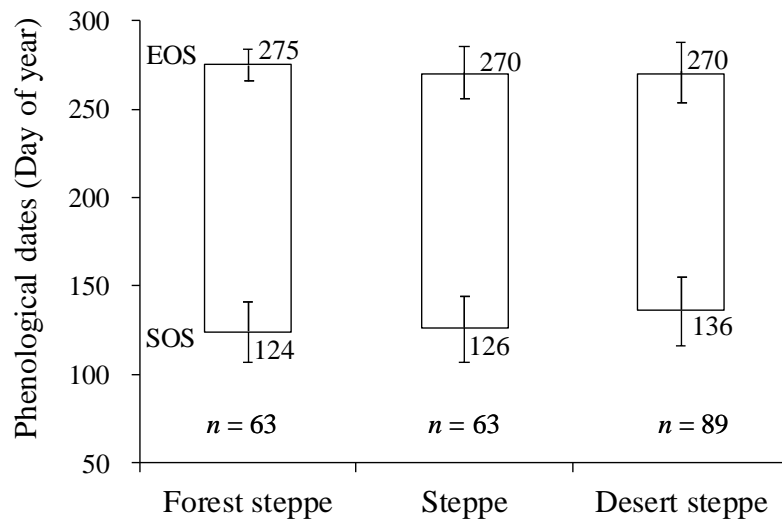
さらに、NASA の地球観測システム(<http://earthdata.nasa.gov/>)のサイトからタイル範囲 h23-h26 及び v03-v04 の MODIS Collection 5 のフェノロジープロダクト MCD12Q2 (2000-2009) を収集した。MCD12Q2 プロダクトは、生育期の開始(EVI 増加の開始)、最大生育の開始(最大 EVI に到達)、生育減退の開始(EVI 減退の開始)、生育の終了時期(最低 EVI に到達)のフェノロジーに関連する 4 層のデータから構成される。本研究では、草原の生育期の開始時期(SOS)及び生育期の終了時期(EOS)の 2 層のデータを使用した。2001~2009 年の SOS 及び EOS の時系列は、24 ヶ所の気象観測所毎に MODIS フェノロジーのデータから抽出した。

データ処理に際し、2000~2009 年の季節毎の平均気温及び降水量は、春季(3-5 月、MAM)、夏季(6-8 月、JJA)、秋季(9-11 月、SON)及び冬季(12-2 月、DJF)に分けて算出した。凍土に蓄積された水分量と SOS 時の雪解けを考慮し、春季の平均気温(MAM-Ta、°C)及び春季の平均降水量(MAM-P、mm/day)と共に、冬季平均降水量(DJF-P、mm/day)及び前年秋季の平均降水量(Pre-SON-P、mm/day)を分析に含めた。また、EOS を影響する草原の健全性に可能な影響要因を考慮し、夏季平均降水量(JJA-P、mm/day)、秋季平均気温(SON-Ta、°C)及び秋季平均降水量(SON-P、mm/day)と共に、分析に含めた。

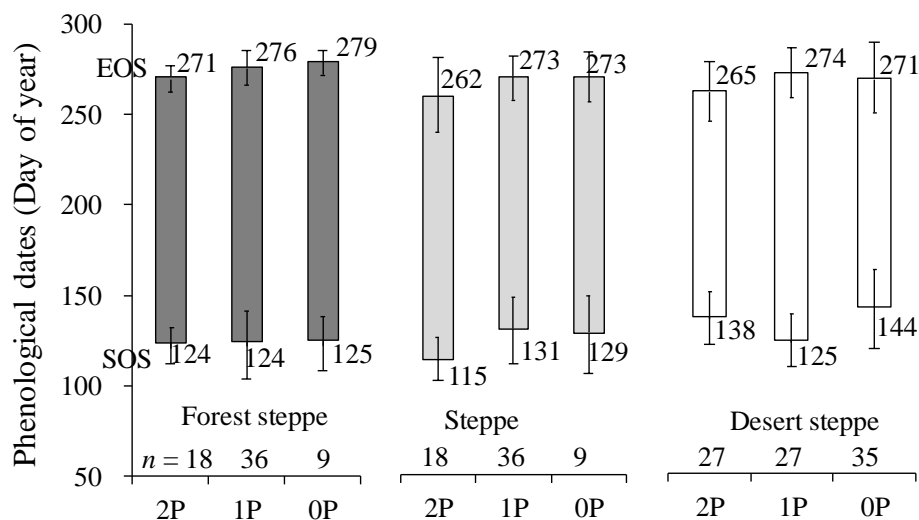
上記のように収集されたデータを用いて、まず、各草原タイプにおける凍土類型毎の SOS 及び EOS 平均値及び標準偏差を算定した。その結果、下記の知見が得られた。

- ・ 森林ステップ、典型的ステップ及び砂漠ステップなど 3 つの植生タイプに分けて解析した結果：寒冷気候帯に分布している森林ステップ及び典型的ステップの SOS は、砂漠ステップより約 10 日早い(図(1)-9)。また、森林ステップの SOS の標準偏差は小さい(森林ステップ 17、ステップ 19、砂漠ステップ 20)。つまり、ステップと砂漠ステップに比べ、森林ステップの SOS の経年変化は小さい。
- ・ 三つの凍土タイプについて各草原タイプのさらなる調査が行われた(図(1)-10)。森林ステップの SOS は、3 つの凍土タイプにおいてほとんど差が無かった。一方、ステップと砂漠ステップについて、凍土タイプによって、SOS の変化は様々である。ステップについては、永久凍土地域の SOS は、季節凍土地域より約半月早く、経年変化が小さい(連続的・不連続的永久凍土の標準偏差は 12、点状的な永久凍土は 20、季節凍土は 22)。砂漠ステップについては、点状的な永久凍土地域の SOS が、季節凍土地域に比べ 2~3 週間早い。
- ・ 図(1)-9 及び図(1)-10 に示すように、森林ステップの SOS は、ステップと砂漠ステップよりも早い傾向が示され、気候の経年変化の影響が小さく、特に永久凍土地域では影響がさらに少ない。つまり、永久凍土はモンゴル草原の SOS への気候変化の影響を緩和する可能性があることを示唆している。
- ・ 各草原タイプの EOS には、大きな違いは見られなかった(図(1)-9)。ステップ及び砂漠ステップの EOS は、森林ステップの EOS に比べ、わずか 5 日早い、森林ステップの EOS は経年変化が小さい(森林ステップの標準偏差は 9、ステップ 16、砂漠ステップでは 18)。

- 各草原タイプに対する3つの凍土タイプのEOSについても、さらなる解析を行った。永久凍土地域の全ての草原タイプのEOSは、季節凍土地域よりも約1週間早い傾向が見られた(図(1)-10)。一方、3つの凍土タイプのEOSの経年変化には大きな違いが見られなかった(連続的・不連続的永久凍土の標準偏差が7、点状的な永久凍土では9、季節凍土は6)。
- 図(1)-9及び図(1)-10に示すように、森林ステップEOSはわずかに遅い傾向があり、経年的な気候変化の影響が少ない。一方、永久凍土地域の全ての草原タイプのEOSは、季節凍土地域よりも約1週間早い傾向が見られ、この地域で秋季の気温が比較的低いことが原因だと考えられる。



図(1)-9 各草原タイプのSOS及びEOS平均値及び標準偏差 (n はSOS及びEOSの記録数(標本数)、エラーバーは標準偏差)

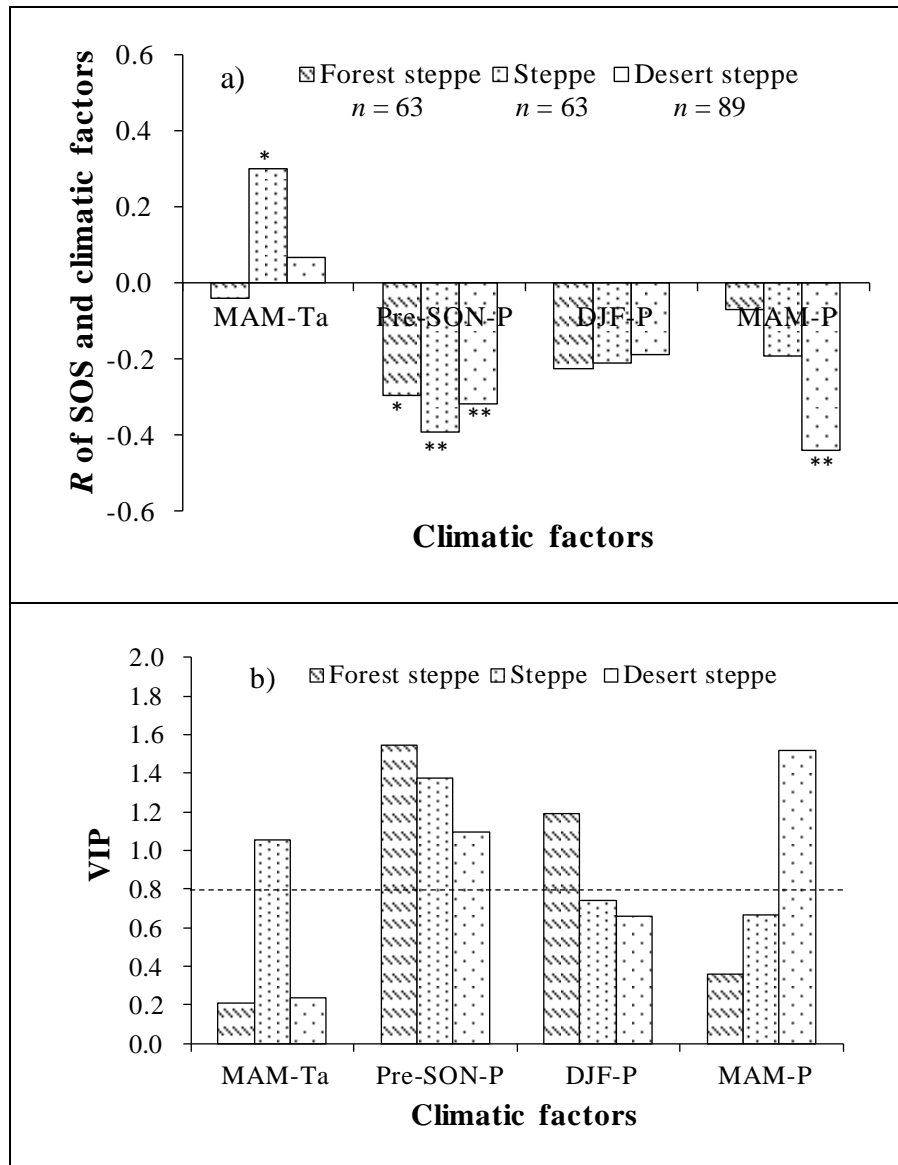


図(1)-10 各草原タイプにおける凍土類型毎のSOS及びEOS平均値及び標準偏差 (n はSOS及びEOSの記録数(標本数)、0P、1P、2Pはそれぞれ季節凍土、点状的な永久凍土、連続的・不連続的永久凍土、エラーバーは標準偏差)

気候的要因と草原フェノロジーとの関連性を解析する方法として、偏相関最小二乗法回帰法 (PLS) を用いた。PLS 分析から得られた投影における変数重要性 (VIP) は、従属変数としての SOS と EOS の変化に影響を与える気候要素 (独立変数) の重要性を表す指標である。Eriksson ら¹⁰⁾ 及び Yu ら¹¹⁾ が示唆したように、VIP スコア 0.8 を超える独立変数は重要な変数とみなされる。本研究では、ピアソンの積率相関係数 (R) と VIP の二つの指標を用いて、気候的要因と草原フェノロジーとの関連性の強さを示している。PLS 分析は、上記の 24 ヶ所の気象観測所からの 2001~2009 年の観測データ (独立変数) 及びそれぞれの観測所の地理的位置に対応する地点の MODIS フェノロジーデータ (従属変数) に基づいている。解析は、それぞれの草原及び凍土の種類によって実施した。まず全データは草原タイプによって 3 つのグループ (森林ステップ、ステップ、砂漠ステップ) に分類され、その次、凍土タイプ毎によって、さらに 3 つのサブグループ (連続・不連続的永久凍土、点状的永久凍土、季節凍土) に分類され、最後に 3 つのグループと 9 つのサブグループについて PLS 分析が行われた。

まず、PLS 分析による得られた相関係数 (R) は、草原タイプによって様々であるが、全ての草原タイプにおいて、SOS と降水量との間に負の相関がある。図 (1) - 11a) が示すように、SOS は Pre-SON-P (前年秋季の降水量) に対して大きな負の相関を示し、森林ステップ ($p < 0.05$)、ステップ ($p < 0.01$) に対して、砂漠ステップの MAM-P (春季の降水量) ($p < 0.01$) 及び Pre-SON-P ($p < 0.01$) についても SOS が大きな負の相関を示している。ステップの SOS は、MAM-Ta (春季平均気温) に対して顕著な正の相関があることに注目すべきである。春の急速な気温上昇が、急速な蒸発による土壤の水分の減少をもたらした場合、ステップの SOS が遅れる可能性があることを示している。SOS の遅延現象は、森林ステップでは土壤水分ストレスが少ないため顕著ではなく、砂漠ステップでは強い土壤水分ストレスがあるため顕著であると考えられた。

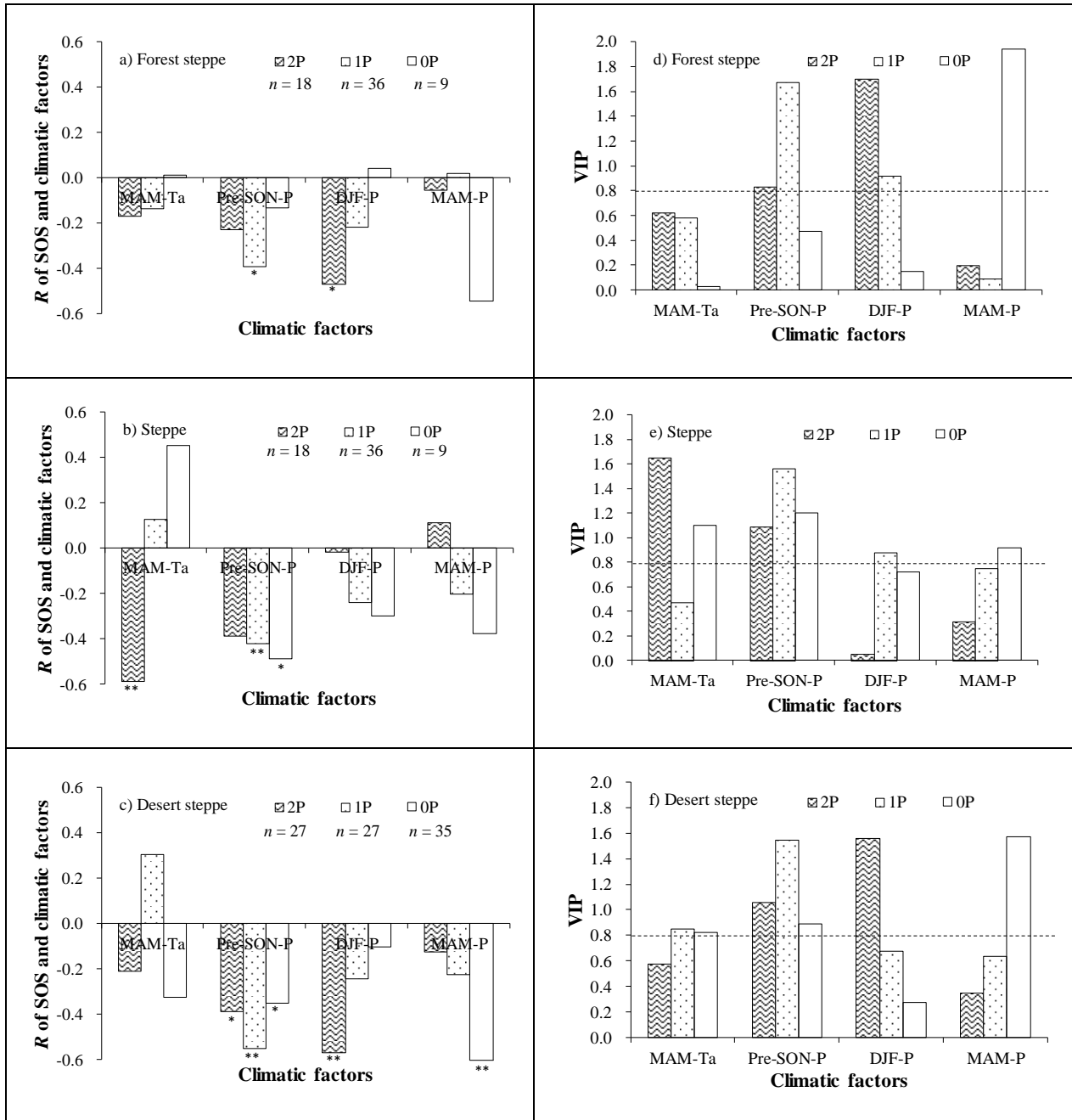
また、PLS 分析による得られた VIP スコアは、SOS に対する気候要因の重要性を示している。図 (1) - 11a) の所見と図 (1) - 11b) の所見は一致する。森林ステップの DJF-P (冬季平均降水量) の VIP スコアは 0.8 より大きい。冬季降水量は、ステップに比べて森林ステップにとってその重要性は大きくないことを示している。上記の所見によって、全ての草原タイプの SOS は、前年度の秋季の降水量に左右される傾向があるが、春季の降水量も砂漠ステップの SOS には重要であることが分かる。



図(1)-11 草原タイプ毎のSOSと気候要因の間のa)相関係数 R 及びb)その重要性VIP
(*は有意水準0.05、**は有意水準0.01。 n はSOSの記録数)

草原のSOSの経年変化を促進する左右的な要因は、凍土のタイプによって異なる。図(1)-12は凍土タイプ別の各草原タイプのSOSと気候要因の間の相関係数 R 及びその重要性VIPを示している。それによると、森林ステップのSOSは、連続的・不連続的永久凍土地域のDJF-P($p < 0.05$)と点状的な永久凍土のPre-SON-P($p < 0.05$)との間に顕著な負の相関を示している。ステップのSOSは、連続的・不連続的永久凍土地域においては、MAM-Ta($p < 0.01$)と負の相関であり、点状的な永久凍土においては、Pre-SON-P($p < 0.01$)との相関関係が顕著であることが分かった。砂漠ステップのSOSは、連続的・不連続的永久凍土ではPre-SON-P($p < 0.05$)及びDJF-P($p < 0.01$)、点状的な永久凍土ではPre-SON-P($p < 0.01$)と、季節凍土ではPre-SON-P($p < 0.05$)及びMAM-P($p < 0.01$)に、顕著な負の相関を持っている。これらの結果を図(1)-12a)~12c)の相関係数 R と図(1)-12d)~12f)の重要度VIPに示す。それによると、点状的な永久凍土の3つのステップのSOS

は前年秋季の降水量に左右されていることを示唆している。連続的・不連続的永久凍土地域においては、森林ステップの SOS は、冬季の降水量の影響を受けており、ステップの SOS は春季の気温、砂漠ステップの SOS は冬季と前秋季の降水量に左右されている。季節凍土においては、砂漠ステップの SOS は春季と前年秋季の降水量に左右されている。



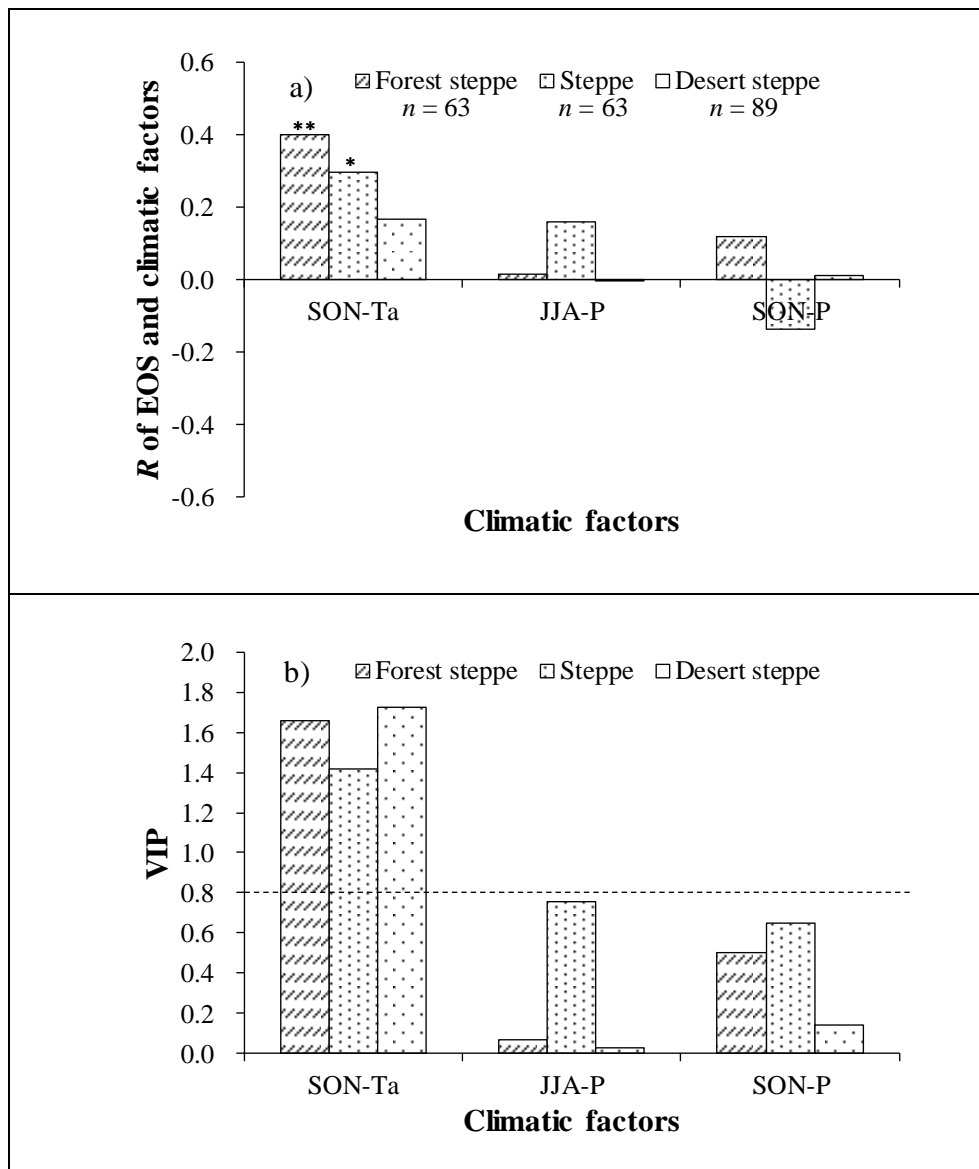
図(1)－12 凍土タイプ別の草原類型毎の SOS と気候要因との相関係数 R (a)～c)) 及びその重要度 VIP (d)～f)) (* は有意水準 0.05、**は有意水準 0.01; n は SOS の記録数; 0P、1P、2P はそれぞれ季節凍土、点在的な永久凍土、連続的・不連続的永久凍土)

図(1)－13 は、三つの草原タイプの EOS と気候要因との相関係数 R (a)) 及び重要度 VIP (b)) を示したものである。それによると、三つの草原タイプの EOS は共に SON-Ta (秋季平均気温) に規

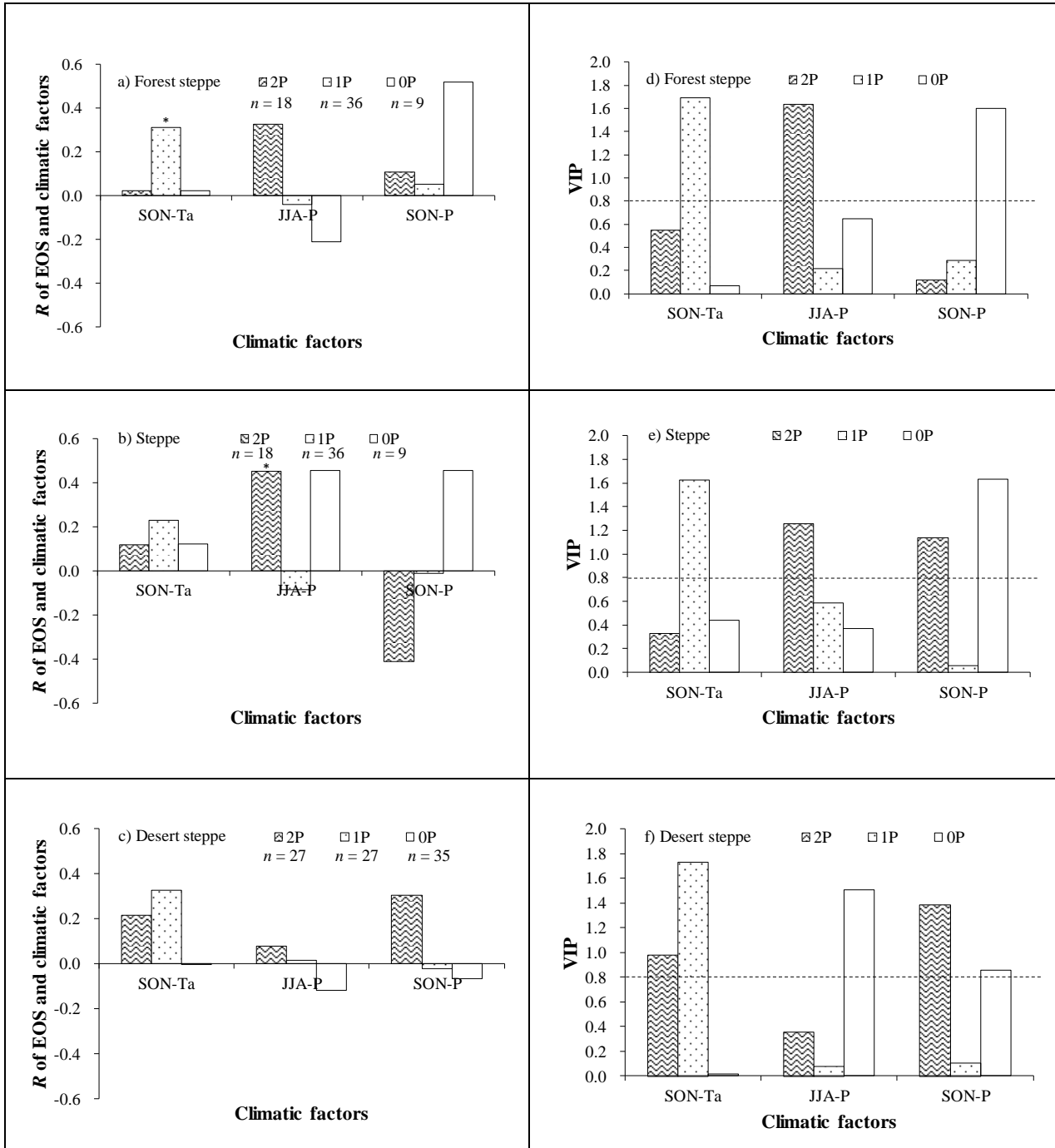
定 ($VIP > 0.8$) されるものの、森林ステップ SON-Ta ($p < 0.01$) とステップ ($p < 0.05$) の EOS と SON-Ta (秋季平均気温) に強い相関があることが分った。

一方、それぞれの凍土類型地域において、三つの草原タイプの EOS と気候要因の間の相関係数 R (図(1)–14a)～c)) 及び重要度 VIP (図(1)–14d)～f)) から見ると、点在的な永久凍土地域の森林ステップの EOS は SON-Ta ($p < 0.05$) と正の相関がみられ、連続的・不連続的な永久凍土地域のステップの EOS は、JJA-P (夏季平均降水量) ($p < 0.05$) と正の相関が見られる。

図(1)–13 及び図(1)–14 から、EOS は降水量よりもむしろ秋季平均気温に左右されることを示しているが、夏季と秋季の降水量が草原の健全性に寄与し、EOS を遅らせる可能性があると考えられる。



図(1)–13 3つの草原タイプのEOSと気候要因の間の相関係数 R (a) 及び重要度 VIP (b) (*は有意水準0.05、**は有意水準0.01; n はEOSの記録数(標本数))



図(1)－14 凍土類型地域別の3つの草原タイプのEOSと気候要因との相関係数 R (a～c)及び重要度VIP(d～f))(*は有意水準0.05、**は有意水準0.01。 n はEOS記録数(標本数)。0P、1P、2Pはそれぞれ季節凍土、点状的な永久凍土、連続的・不連続的永久凍土を示す)

永久凍土の融解のシグナルとしては、永久凍土層の上の活動層厚さ(ALD)の増加である。年間平均気温が異なる3つの観測サイトにおいて、降水量(ANN-P)はほぼ同じ条件となり、気温(ANN-Ta)の違いで生じた牧草フェノロジー期間(SOS, EOS)の違いと活動層厚さ(ALD)の比較結果を表(1)－4にまとめた。その結果、Davaatの森林ステップサイトに比べて、Davaatのステップサイト及びNalaikhステップサイトでは、平均気温が 1°C 上昇した場合と 2.4°C 上昇した場合、活動層厚さ

(ALD)がそれぞれ 0.5m と 1.5m と大きいことが示された。また、Davaat の森林ステップサイトに比べて、Davaat のステップサイト及び Nalaikh のステップサイトでは、SOS と EOS の標準偏差がいずれも大きいことが分った。このような、定点観測サイト間比較から、気温上昇に伴って活動層の厚さ(ALD)が厚くなり、草原の生育期間が延びる傾向が示唆された。

表(1)－4 観測サイトにおける気候要因、活動層の厚さ (ALD)及びフェノロジー (SOS と EOS) の比較 (ANN-Ta は年間平均気温、ANN-P は年間総降水量、SD は標準偏差)

サイト	Nalaikh		Davaat		Davaat	
	ステップ サイト		ステップ サイト		森林ステップ サイト	
ANN-Ta (°C)	-2.8		-4.2		-5.2	
ANN-P (mm/年)	260		270		276	
ALD (m)	3.5		2.5		2.0	
Year	SOS	EOS	SOS	EOS	SOS	EOS
2008			5/8	10/10	5/9	10/12
2009	4/23	10/14	4/26	10/19	4/23	10/18
2010	4/28	10/6	5/10	9/30	5/3	10/4
2011	5/4	10/3	5/13	10/4	5/1	10/4
2012	5/31	10/26	5/8	10/19	4/22	10/19
平均	5/6	10/12	5/7	10/10	4/29	10/11
SD (日数)	16.9	10.3	6.5	8.6	7.1	7.3

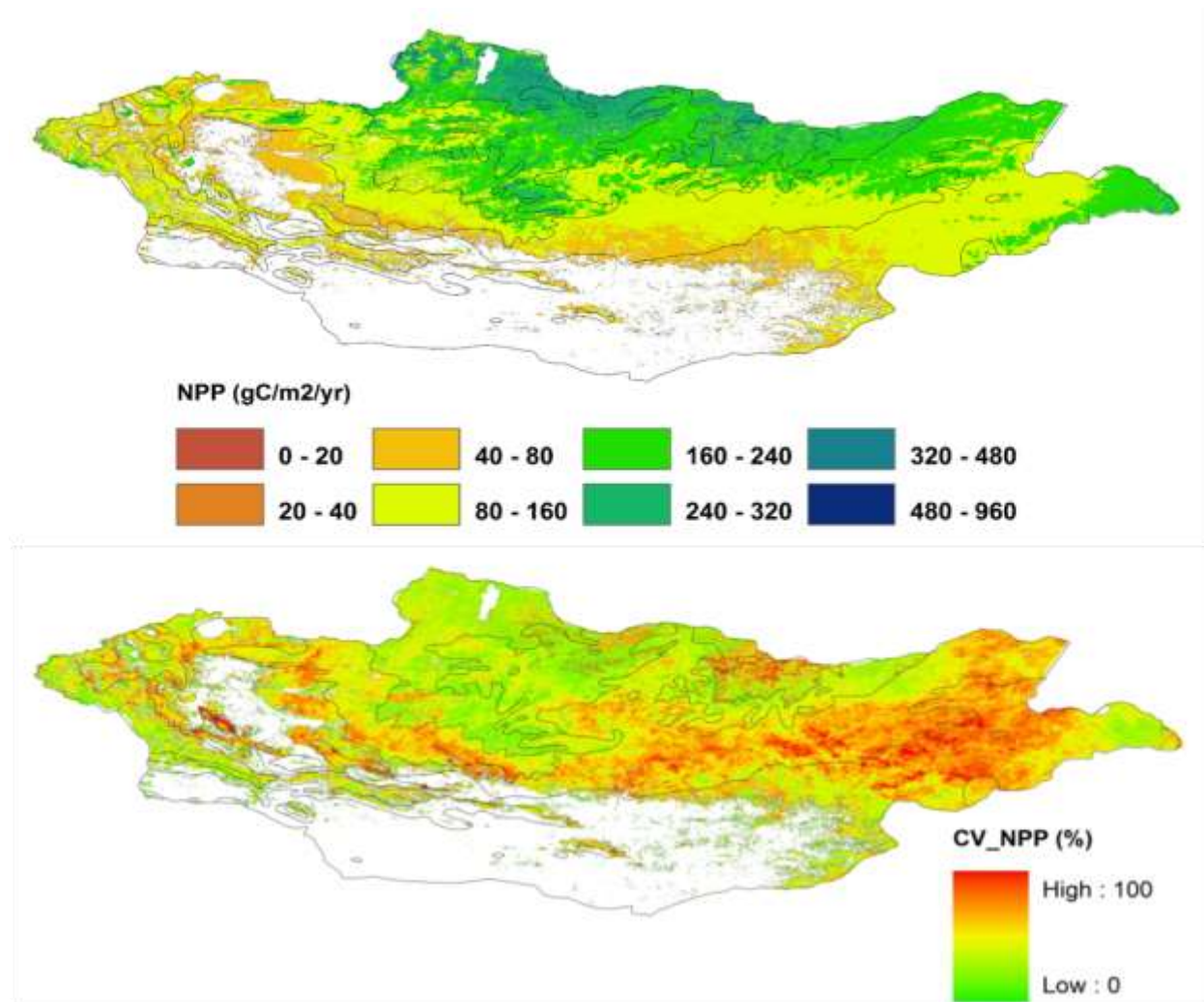
以上の解析から、モンゴルにおける降水量は草原の SOS と EOS を強く制御していることが示され、凍土は翌年の草原の生育に対して重要な役割を果たしていることが明らかになった。また、凍土の存在はモンゴル草原の生態系に大きな影響を与えていること、及び温暖化による凍土の融解に伴って、近い将来のモンゴル草原の脆弱性が高くなる可能性が示唆された。地球温暖化は、連続的・不連続的な永久凍土が点在的な永久凍土や季節凍土へと縮小する主な原因となることが考えられる。凍土の融解に伴って森林ステップや典型的ステップの劣化が進行し、砂漠ステップへ変遷する可能性があると考えられる。これにより、現存の草原が退化し、その面積が減少へとつながる恐れがある。さらに、草原の生育時期が短くなり、草原の生産性は低下していくことも考えられる。

2) 牧草生産量の定量的評価

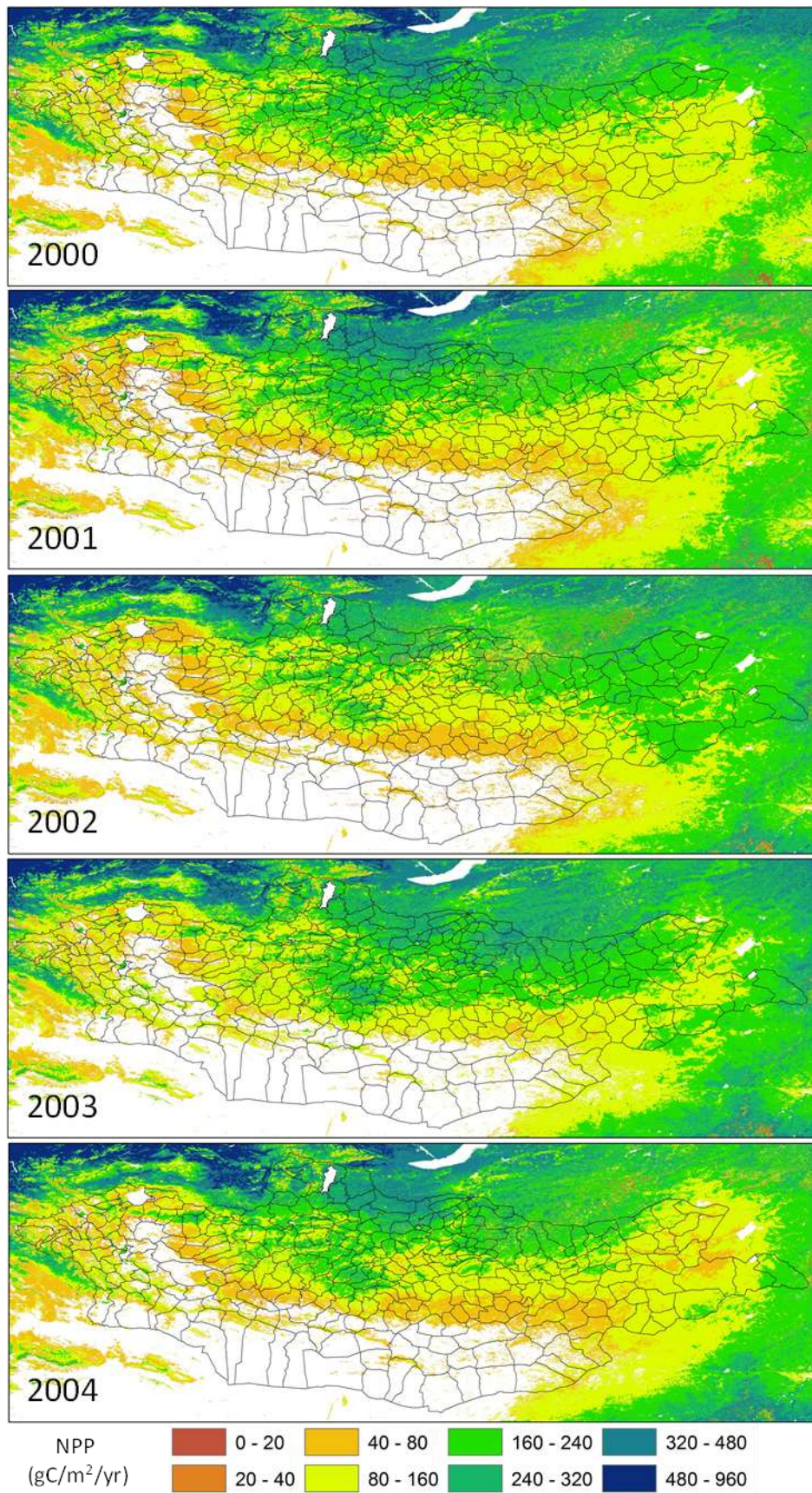
モンゴルでは全人口の約40%が気候の影響を強く受ける農畜業（遊牧）に依存してきた。従って、これらの人口は農業総生産の34.6%、輸出の30%に貢献しているとされる。気候変動は植物の多様性と季節性、さらに、牧草生産性に大きな影響を与えられられる。Tserendashら¹²⁾の研究によると、地球温暖化による気温と発散量の増加がモンゴルの草原における牧草生産力を約10から20%低下させると推定されている。一方、Batimaら¹³⁾の研究によると、過去60年の間、モンゴルでは高栄養植物が1.5-2.3倍減少しており、気温上昇と降水量の減少により、更なる減少が見込まれている。このように、気候変動の影響は牧草・家畜生産量、そして最終的には地域及び国の食料生産能力を脅かすことになる懸念されている。

牧草・牧畜生産量の影響要因は気象、水文、土壌、草原類型及び牧草の質など様々であるが、そのうち、最も影響が大きいのは、干ばつ、ゾド及び牧草の利用強度などであると考えられる。

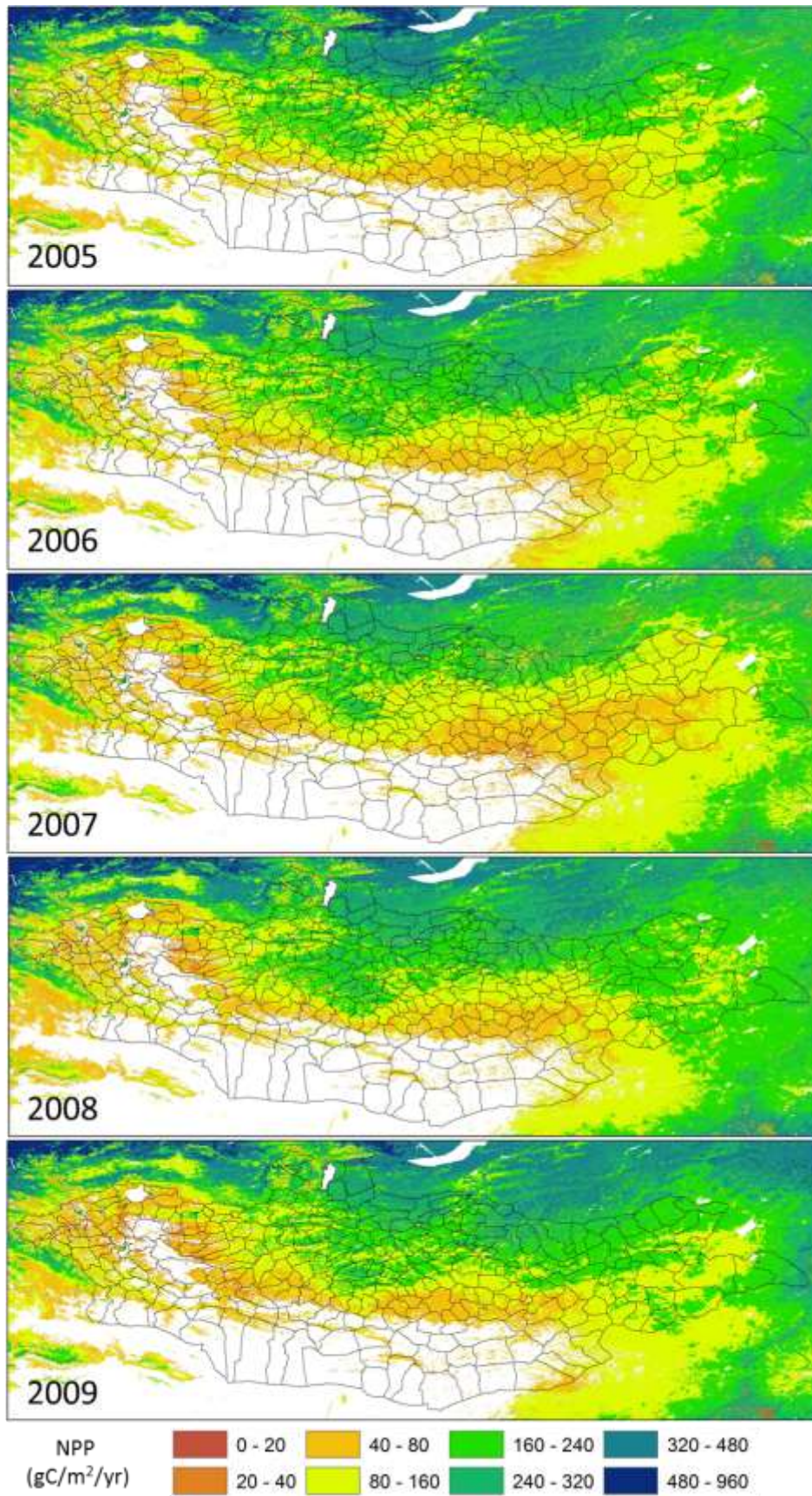
そのため、本研究では気象や水文観測データ及び植生パラメータ及び地形や土壌特性などのGISデータを生態系モデル(Biome-BGC)に与え、モンゴル全土の1 km解像度の植生の2000-2012年の純一次生産(NPP)の平均値の空間的分布(図(1)-15、上)及びその変動指数CV(図(1)-15、下)を算定した。それによると、モンゴル北部の連続・不連続的な永久凍土地帯ではNPPの値が高く、変動が小さいが、南部の点状的な永久凍土地帯、特に季節的な凍土地帯ではNPPの値が小さく、変動が大きかった。この結果から、北部の永久凍土地帯では、牧草生産量が高く、しかも安定的に提供できることと、南部の点状的永久凍土及び季節的凍土地帯では、牧草生産量が小さく、しかも安定的に提供できないことが明らかとなった。2000-2012年のNPP経年変化を図(1)-16で示す。



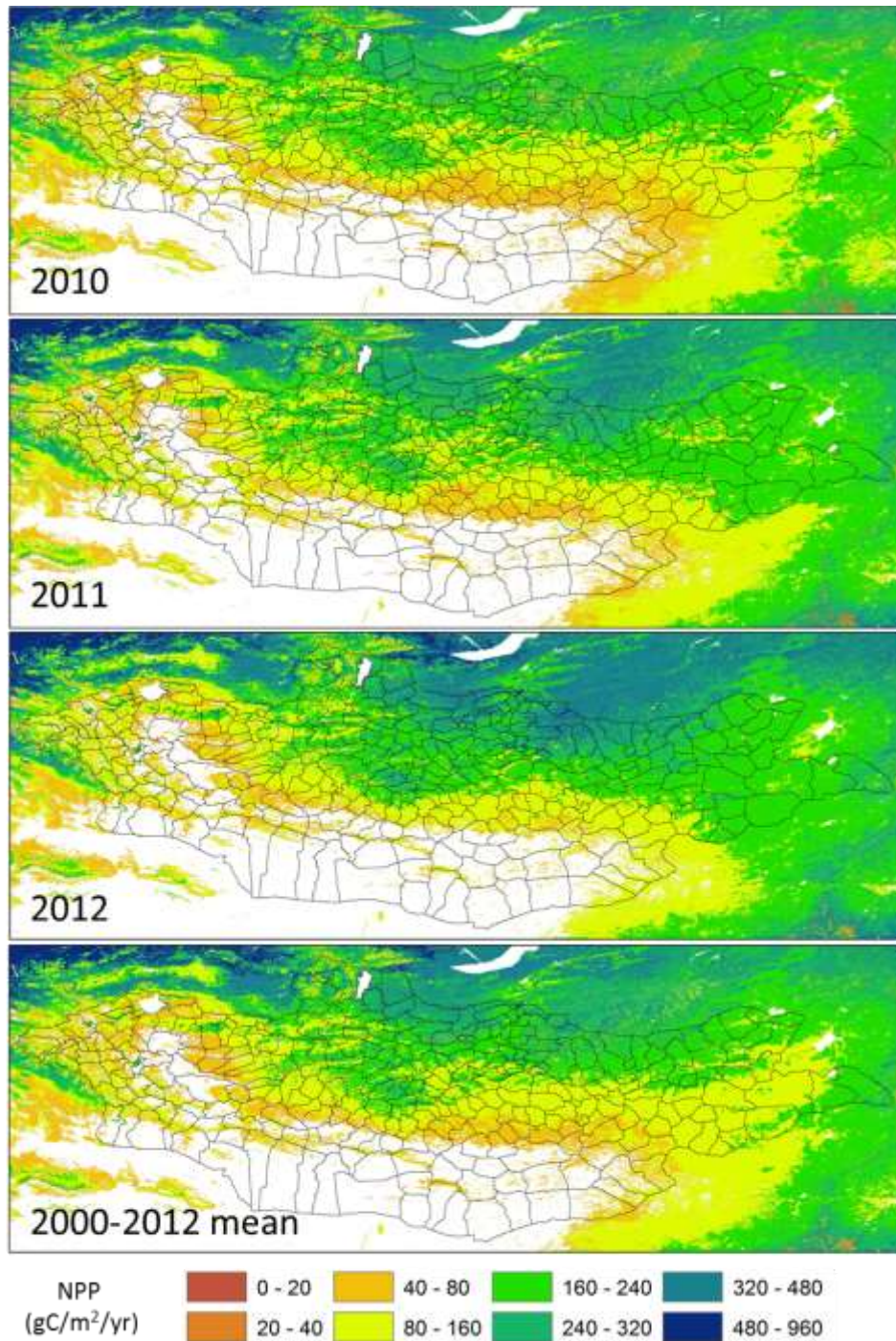
図(1)-15 純一次生産量 (NPP) の平均値 (上) と変動指数 (下) 分布図 (2001-2012年平均値)



図(1)-16a モンゴル全土の純一次生産(NPP)の経年変化(2000-2004)

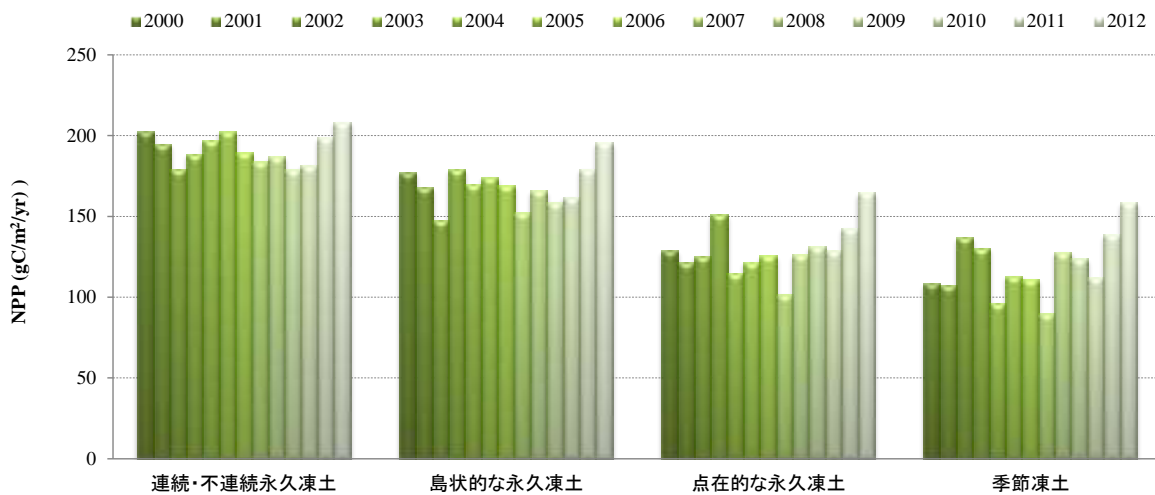


図(1)-16b モンゴル全土の純一次生産(NPP)の経年変化(2005-2009)



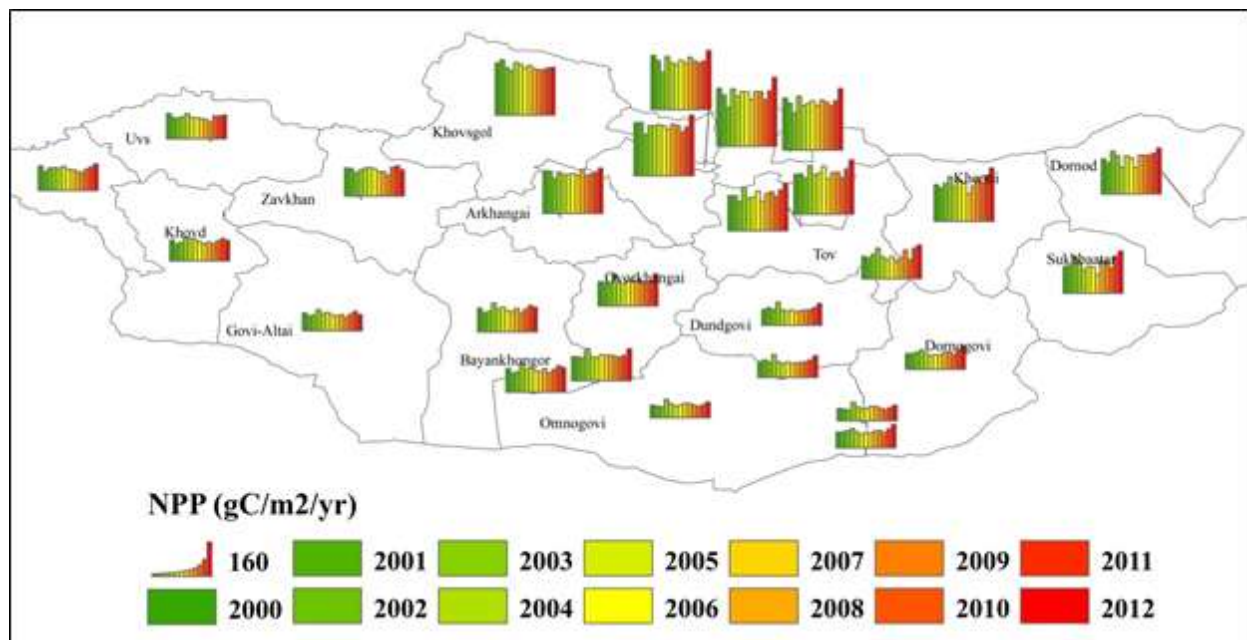
図(1)-16c モンゴル全土の純一次生産(NPP)の経年変化(2010-2012)と2000-2012の平均値

また、各凍土地域のNPPの季節変動も解析した。それによると、モンゴル北部の永久凍土帯ではNPPが高く、生産量が高いことが分かった。特に夏季の間に、連続的・不連続的永久凍土地域の生産量は他の地域や全国平均値より遥かに高いことが分かった。さらに、2000-2012年の凍土分布類型毎の生産量も集計した。それによると、北部の連続的・不連続的な永久凍土地帯では変化傾向が見られなかったが、南部の点状的な永久凍土地帯と季節的な凍土地帯では、2007年までに減少傾向があったが、それ以降に上昇傾向に転じたことが分かった(図(1)-17)。



図(1)-17 永久凍土の種類毎の年平均一次生産量 (NPP) の集計結果 (2000-2012年)

最後に、行政ニーズに合わせて、モンゴルのソム (SUM、日本の市町村レベルと相当する) とアイマグ (AIMAG、日本の県レベルと相当する) など各行政区レベルのNPPを集計した。それによると、北部のセレンゲ (Selenge) 県、ボルガン (Bulgan) 県、フブスグル (Hövsögöl) 県、トゥブ (Töv) 県及びヘンティー (Hentiy) 県では、一次生産量が高いが、南部のウムヌゴビ (Ömnögovi) 県、ドルノゴビ (Dornogovi) 県、バヤンホンゴル (Bayanhongor) 県などでは、生産量が低いことが分かった。総体的に、モンゴルの牧草生産量は「北高南低」と「東高西低」の分布特徴がある事が明らかとなった (図(1)-18)。



図(1)-18 アイマグ (Aimag) 毎の年平均一次生産量 (NPP) の集計結果 (2000-2012年)

(3) 永久凍土融解に伴う陸域生態系の脆弱性評価

1) 地表面水分不足指数による草地乾燥化の検出

モンゴル全土のおよそ3分の2の地域は、乾燥・半乾燥地域に属しており、降水量の経年変動が非常に激しい。また、降水量は1年間の中でも、季節や場所による不均一性と年々変動が激しく、乾燥・半乾燥気候帯の特徴が大きく表れる。そのため、植生と水に乏しい地域は、干ばつ地域と見なされる。

モンゴルでは、植物の生育期間は5月から9月までと短い季節性がある。牧草生産力は、夏季の条件に応じて、広範囲にわたって変化する。夏に干ばつが発生すると牧草生産力の低下が見られ、山地では12-48%、半砂漠では28-60.3%低下する。また、モンゴルの家畜は夏から秋にかけて、成長に必要なエネルギーや栄養を蓄える。家畜は、質の良い牧草の豊富な初夏に体重を増やし始め、晩秋に最も体重が重くなる。夏に干ばつが長引くと、家畜は越冬に必要な体力やエネルギーを蓄えることができない。従って、干ばつは気候変動に対する家畜の脆弱性の重要な決定要因のひとつと言える。

夏季条件の良し悪しに拘らず、遊牧民は長い厳寒の冬の後の夏季をくつろいで過ごす。一方、家畜は深刻な干ばつ状況でも干ばつ期間中に死亡することは少ない。それ故、アフリカや南アジア諸国とは異なり、モンゴルの干ばつは自然災害と見なされなかった。しかしながら、干ばつは (a) 牧草の減少 (b) 家畜が好む種類の牧草の減少 (c) 利用可能な飲み水の減少 (d) 牧草地の不毛などを引き起こす。また、干ばつが発生すると、遊牧民は干し草、その他の家畜用補助飼料、自分達の日用品などの準備が困難になる。さらに重要なことには、家畜は厳冬や春の暴風を乗り切るために必要な体力（カロリーや脂肪など）を干ばつの影響で蓄えることができないため、大量死に至る。そのため、冬季の家畜の死亡率にとって、前年度の夏の条件が重要な決定要因であると結論付けた。干ばつが長期に亘った場合、例えゾドが発生しなくても、家畜は厳冬を凌ぐために必要な体力やエネルギーを蓄えることができない。

モンゴルでは、1940年から2008年の間に干ばつは5%の有意水準で増加傾向にあった。特に1990年代から急激に増加している。モンゴルで最悪の被害となった干ばつは、1999年、2000年、2001年、2002年、2007年、2008年に連続して発生し、国土全体の50%から70%が影響を受けた。このような長期間に亘る深刻な干ばつは、過去60年間には観測されたことがなかった。

干ばつの発生地域から見れば、1970年から1990年の間に、ウムヌゴビ県、ホブド県、オブス県で、干ばつ平均指数は最高値に達し、1990年以降は、中央モンゴルや西モンゴルでも同様の値に達し、オブス県、ホブド県、ゴビ・アルタイ県、バヤンホンゴル県、ウムヌゴビ県、ドンドゴビ県、トゥブ県などが含まれる。モンゴルにおける干ばつの発生頻度や強度が増加したことは、地球温暖化との関連性が高いと解釈できる。そのため、干ばつの傾向やその動態を理解することは非常に重要であり、将来のリスクを軽減するだけでなく、気候変動適応策の確立や実施にも役立つ。

干ばつは、短期的に発生する気候現象であるが、植生の長期的な乾燥化現象を表すために、土壌水分が最も重要な指標である。土壌水分は植生の種類、土壌の特性、そして永久凍土環境に依存する植生の成長に影響を与える要因である。土壌水分状況は永久凍土環境の変化と植生ダイナミクスを結びつける重要な因子であり、永久凍土の融解は主に土壌水分条件の変化を通して草原生態系に影響を与える。永久凍土の劣化に伴って、活動層の土壌水分が減少し、地表面の乾燥化

が進むと考えられる。

地表面の乾燥状態を表す指標は、Moranら(1994)¹⁴⁾によって考案された乾燥指数の一つである水分不足指数(WDI: Water Deficit Index)がある。この指標はであり、測定困難な土壌水分の代わりに、地表面の水分不足状況を表す最も有効な指標として広く使用されてきた。Wangら(1999)¹⁵⁾は土地被覆や植生指数などの衛星データ、地形や土質などのGISデータを用いて、広域なWDI推定モデルを開発し、乾燥・半乾燥地域において砂漠化のリスクエリアを評価した。WDIの推定モデルの基本式は式(3)で示す。

$$WDI=1-ET/PET \quad (3)$$

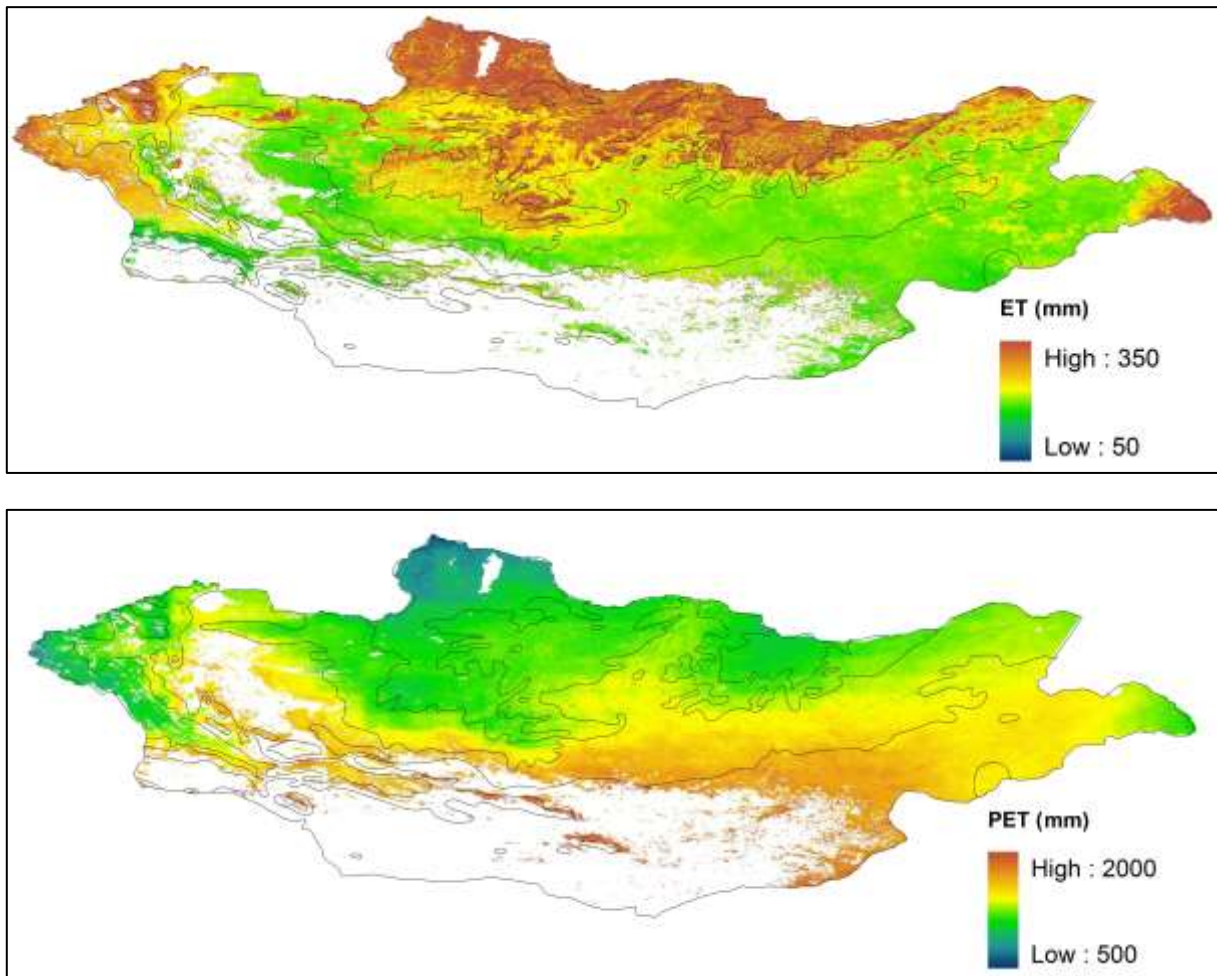
ここで、ETは地表面の実蒸発散量(actual evapotranspiration)であり、土壌からの蒸発(E)と植生から蒸散(T)を合わせたものであり、水循環の重要な要素の一つである。ETの推定手順は煩雑であり、最もよく使われた推定法はペンマン・モンティース法(Penman-Monteith method)である。PETは可能蒸発量(potential evaporation)であり、地表面流出のない広大で均一な湿潤面で生じる蒸発散量である。

ETとPETについて、アメリカモンタナ大学のNumerical Terradynamic Simulation Groupは、NCEP/NCAR再解析気象データとMODIS土地被覆データ(MOD12)と葉面積指数(MOD15)のデータを、ペンマン・モンティース法(Penman-Monteith method)に入力し、MOD16というプロダクトとして公開されている(Muら、2007、2011)¹⁶⁻¹⁷⁾。本研究では、まず、MOD16のデータを用いて、モンゴル全域の2000-2012年の蒸発散量(ET)と可能蒸発量(PET)の年々変動及びその平均値(図(1)-19)を求めた。その結果、モンゴル北部の永久凍土地帯では、ETが高くPETが小さ示された。一方で、南部の点状的な永久凍土地帯や季節的な凍土地帯では、ETが低くPETが高いことを示し、ETとPETの地域性が示唆された。

本研究では、MOD16プロダクトに基づいたETとPETのデータをWDIの計算式(3)に入力することで地表面の水分不足指数(WDI)を算定した。WDIは0の場合、地表面は水面または水分飽和状態であることと、WDIは1の場合、地表面は完全に乾燥状態であることを示し、土壌水分含有量が0に近いことを指す。WDIに基づく地表面の水分不足・乾燥状態の評価基準を表(1)-5に示す。

表(1)-5 水分不足指数(WDI)による地表面乾燥状態の評価基準

WDI	分類(日本語)	分類(英語)
≤ 0.2	極度な湿潤	Extremely wet
0.2~0.3	中度な湿潤	Moderately wet
0.3~0.4	軽度な湿潤	Slightly wet
0.4~0.6	正 常	Near Normal
0.6~0.7	軽度な旱魃	Mild drought
0.7~0.8	中度な旱魃	Moderate drought
≥ 0.8	極度な旱魃	Extreme drought

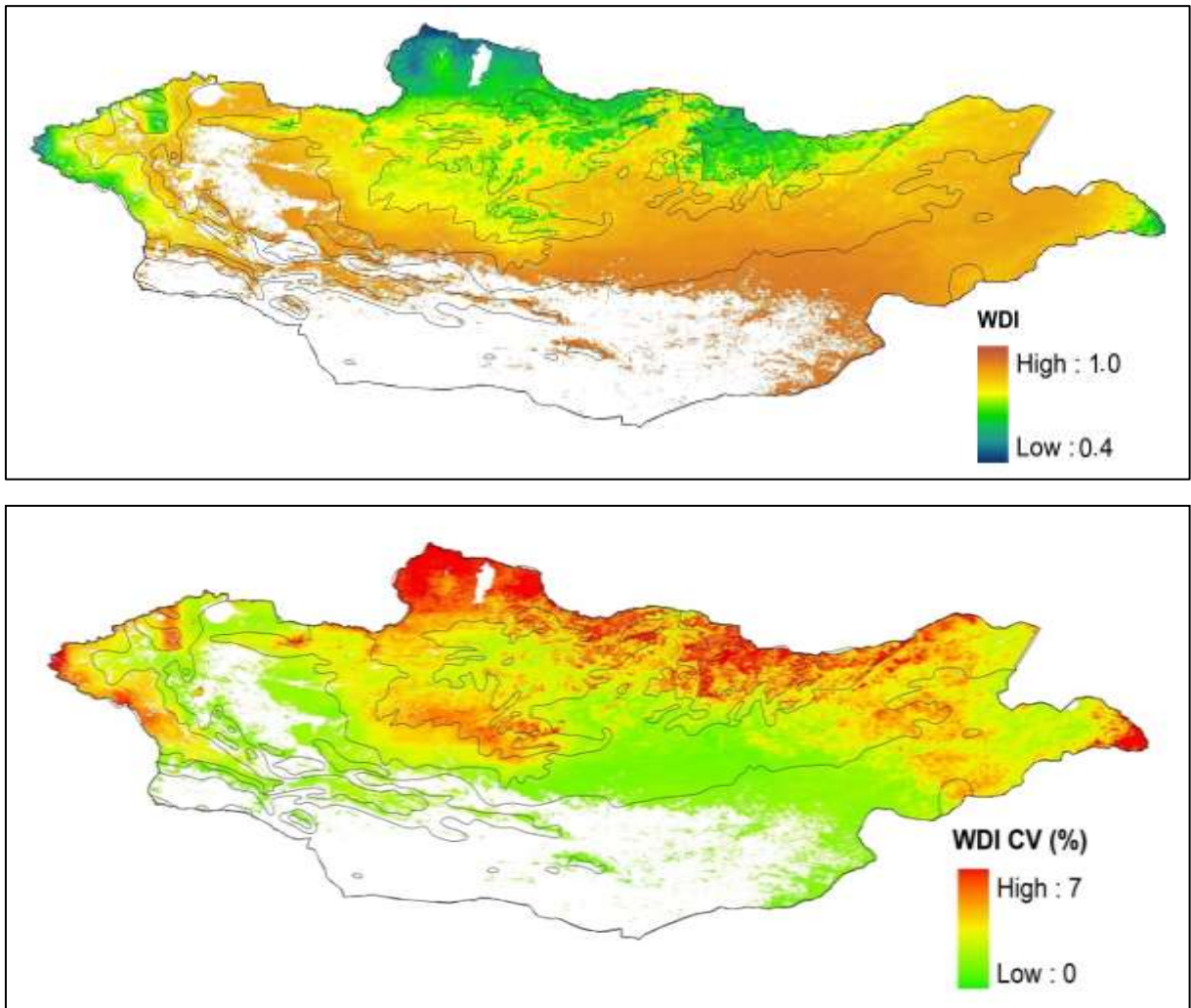


図(1)-19 蒸発散量（上）及び可能蒸発量（下）の分布図（2000-2012年の平均値）

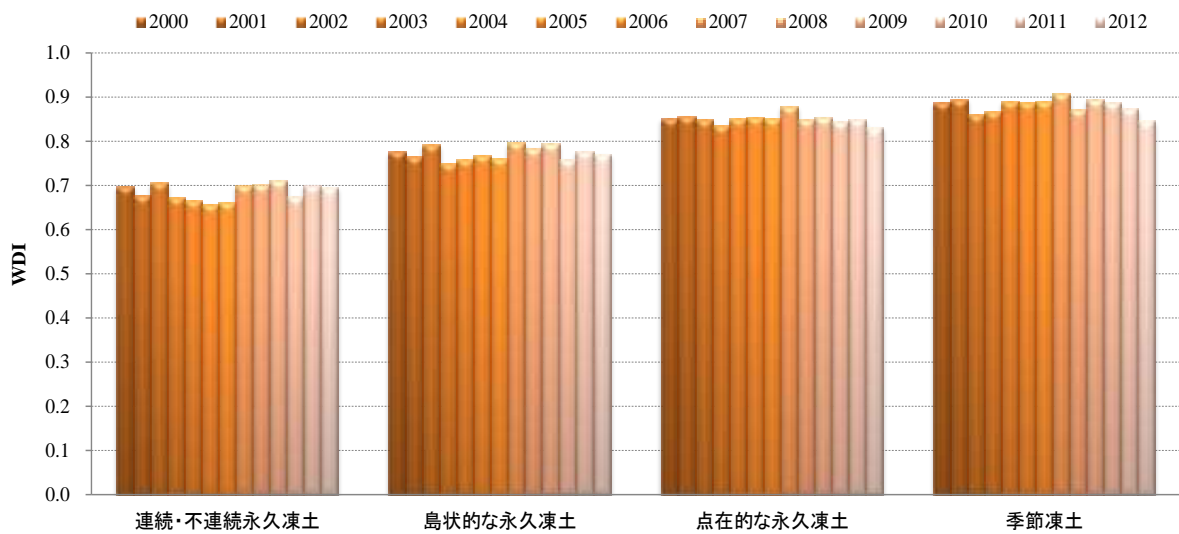
本研究では、2000-2012年のWDIの平均値及び変動指数CVを算定した。それによると、モンゴル北部の連続・不連続的な永久凍土地帯では、WDIが小さく、地表面の乾燥状態は「正常」か「軽度な旱魃」の範囲内であるが、南部の点状的な永久凍土地帯や季節的な凍土地帯では、WDIが70%を超え、地表面の乾燥状態は「中度から極度な旱魃」となっていることが分かった（図(1)-20、上）。

また、最近13年間のWDIの変動指数（図(1)-20、下）を算定した結果、北部の連続・不連続的な永久凍土地帯ではWDIの値が小さいが、年々変動が大きいことが示された。一方で、南部の点状的な永久凍土地帯や季節的な凍土地帯では、WDIの値が大きい、年々変動が小さいことが分かった。つまり、モンゴル北部の連続・不連続的な永久凍土地帯では地表面の水分量が多く、植生の成長に水分ストレスが小さいと考えられ、南部の広域の季節凍土地域では地表面が乾燥していて、植生の成長に大きな水分ストレスを与えていると考えられる。

さらに、ここ十数年間の乾燥状態の変化を探るため、本研究では、各凍土類型地帯におけるWDIの経年変化を集計した（図(1)-21）。それによると、北部の連続・不連続的な永久凍土地帯では、WDIの経年変化の上昇と降下傾向が見られなかったが、南部の点状的な永久凍土地帯及び季節的な凍土地帯では、2000-2007の間に上昇傾向（乾燥化）であったが、2008以降に降下傾向（湿潤化）にあることが分かった。



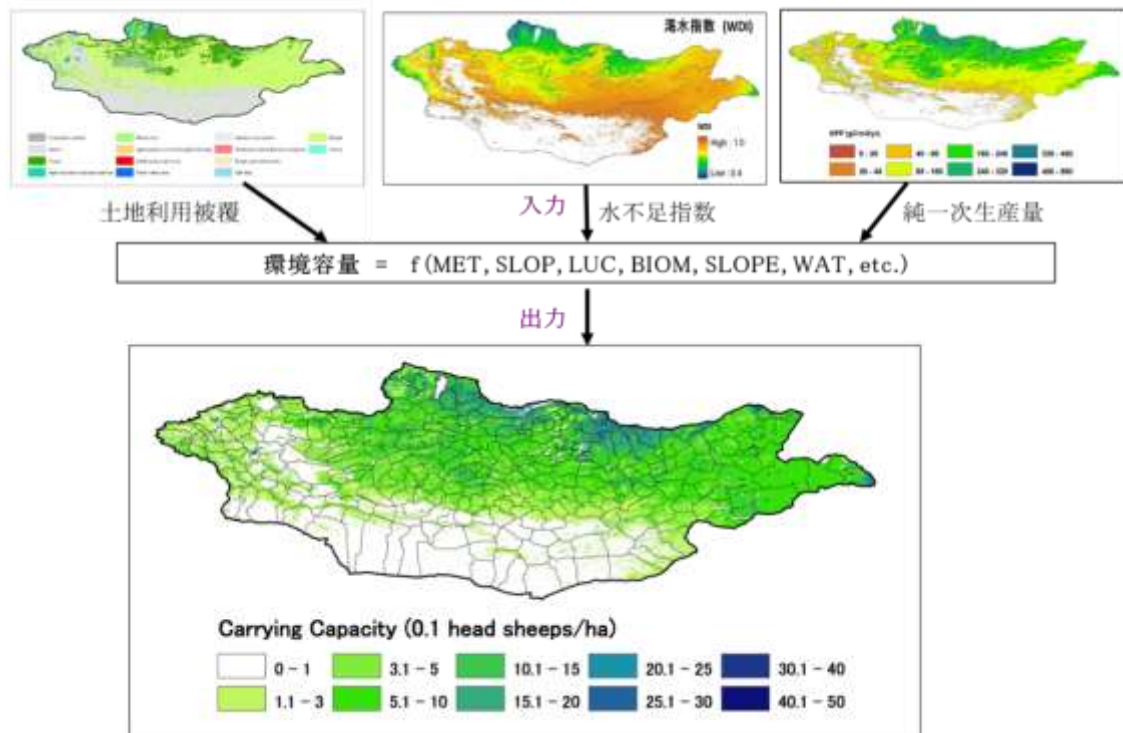
図(1)-20 モンゴル全土の水分不足指数 (WDI) の平均値(上)及び変動指数(下)の分布図 (2000-2012年)



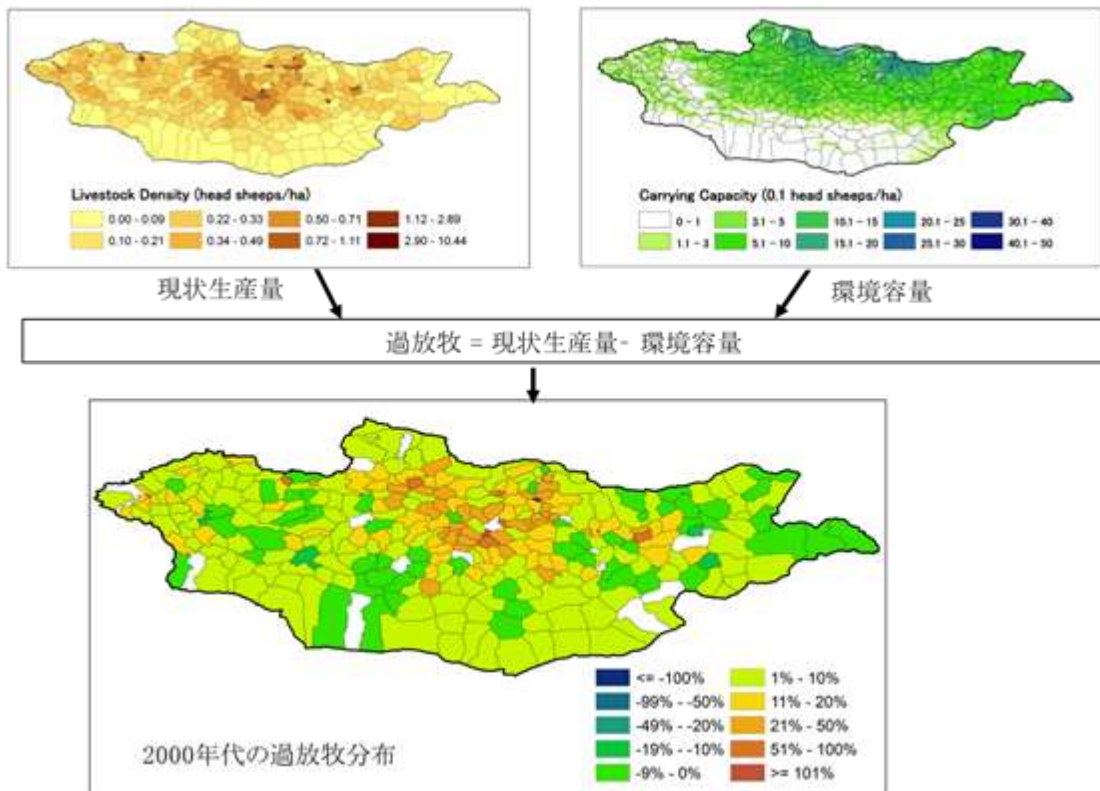
図(1)-21 各類型の凍土地帯におけるWDIの経年変化 (2000-2012年)

2) 環境容量を超えた過放牧地域の検出

過放牧の状況を把握するため、まず、牧草地の環境容量、いわゆる牧畜収容力の推定が必要となる。環境容量とは、放牧地において適切な再生産が維持されるための環境容量を指標化したものと定義されている。本研究において、FAOで開発されたSimSAGS(Simulation of a Semi-arid Grazing System)を用いた草原の環境容量を評価した。SimSAGモデルは、植生種組成毎のバイオマスと家畜種毎の頭数を土壌データや気候・降水量データ、水場の位置情報等を元に計算を行う事ができる。空間的な不均質性については、グリッド内のセル数の選択により表現し、対象地域を格子状に分割し各格子に地形、気象、植生及び土壌の情報を与える事により空間分布を表現する。隣接する格子への土壌水分の流出や家畜がより摂餌に適した格子に移動する等の格子間で生じる現象を解く事により、家畜の餌探索行動や、水域からの距離に応じた土壌水分や植生の違いを解析に反映する事ができる。本研究課題のサブテーマ(2)において、Nalaikhサイトに近いTov県Bayanソムを対象に1991年4月と2005年4月を起点とした2ケースについてSimSAGSモデルの有効性を実証した。本解析結果から、対象としたBayanソムは、羊の飼育に対して環境容量かなり劣化している事が分かった。この実証研究によって改良されたモデルをモンゴル全土に適用することで、図(1)－22で示した環境容量の分布図を作成した。入力データとして、地形、気象、植生及び土壌の情報の他に、草地類型と家畜の摂取量、水場の変わりに水分不足指数(WDI)及び純一生産量(NPP)などのデータを用いた。この結果からみると、モンゴル北部では環境容量が1ヘクタール当たり2-4頭になるに対して、南部では0.5頭/ヘクタール以下であることが分かった。さらに、推定した草原の環境容量と現状の家畜頭数の差による放牧圧の分布状況を推定した。その結果、モンゴル中央部、特に首都のウランバートル市周辺地域では、現状の家畜放牧量がすでに環境容量を大きく超え、過放牧の地域特性を把握できた(図(1)－23)。



図(1)－22 牧草地の環境容量の推定モデル及び推定結果



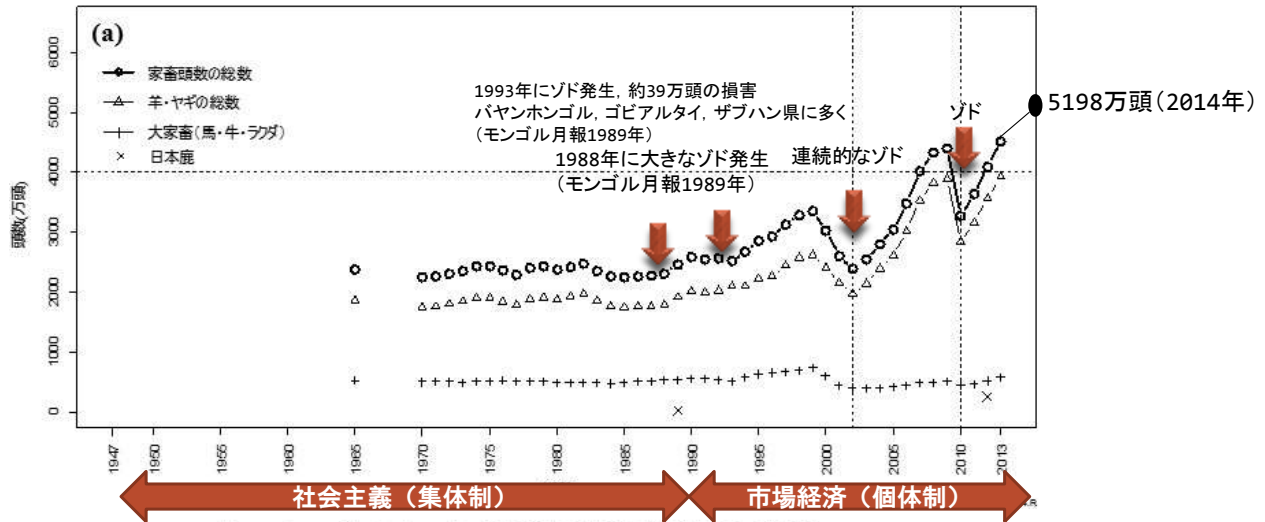
図(1)－23 現状の家畜頭数と草原の環境容量との差による推定したソムレベル放牧圧分布図

過放牧の原因について、気候変動の影響よりも、人間活動による牧草地の利用強度の増大が主な原因だと考えられる。モンゴルでは、市場経済の移行に伴って、社会主義時代の遊牧体制で行われてきた体制上なくした対策が多くあったとされる。例えば集体制で行っていた自然災害に対応するための苜草量が1989年以降の市場経済の導入に従って2000年までに減少してきたことが統計データから示された。2000年以降、苜草量を増やしているが、2000年以降の2期に亘るゾド対応に遅れた対策と考えられる。統計データから県毎の苜草量と家畜頭数の割合から2期に災害頭数と苜草量は相関関係を示した。苜草量の不十分な県地域においては災害が大きく、苜草量が多い県地域では災害が低かったことが示され、自然災害への対応策の重要性が示唆された。

モンゴル国統計局による統計データの公表サイト (<http://en.nso.mn>) から1970年代以降40年間余りの統計データを解析し、モンゴルの農畜産の変遷及びその地域特性を考察した。図(1)－24はモンゴル全国の家畜頭数の変化を示したものである。それによると、1989年以降の市場経済移行に伴い、モンゴルの家畜頭数が増加しつつあるが、2期に亘る自然災害による影響が大きいことが示された。そのうち、最も大きな被害を発生したのは、2000-2002年におけるゾドによる被害頭数が約950万頭、2010年のゾドによる被害頭数が約1,100万頭を超えたと推定された。特に、中央モンゴルでは地方からの移住により人口密度が急速に上昇しているため、家畜の過放牧も増加傾向にある。ホブド県では、1970年から1990年の間に草地資源の濫用が見られ、その後、1990年以降には、ウムヌゴビ県、ドルノゴビ県、バヤン・ウルギー県、オブス県を含む西モンゴルと中央モンゴル全体で過放牧が始まった。ホブド県、ボルガン県、ウムヌゴビ県では、特に過放牧が激

しい。牧草地利用指数の変化は、家畜頭数の動態と同様の傾向を辿り、1970年から1990年の間は比較的平穏で、その後1999年までは増加し続け、2000-2001年の間に干ばつとゾドの影響を受けて減少したが、2002年以降は急速な増加に転じ、2010年に発生した大きなゾドの影響で下落した。

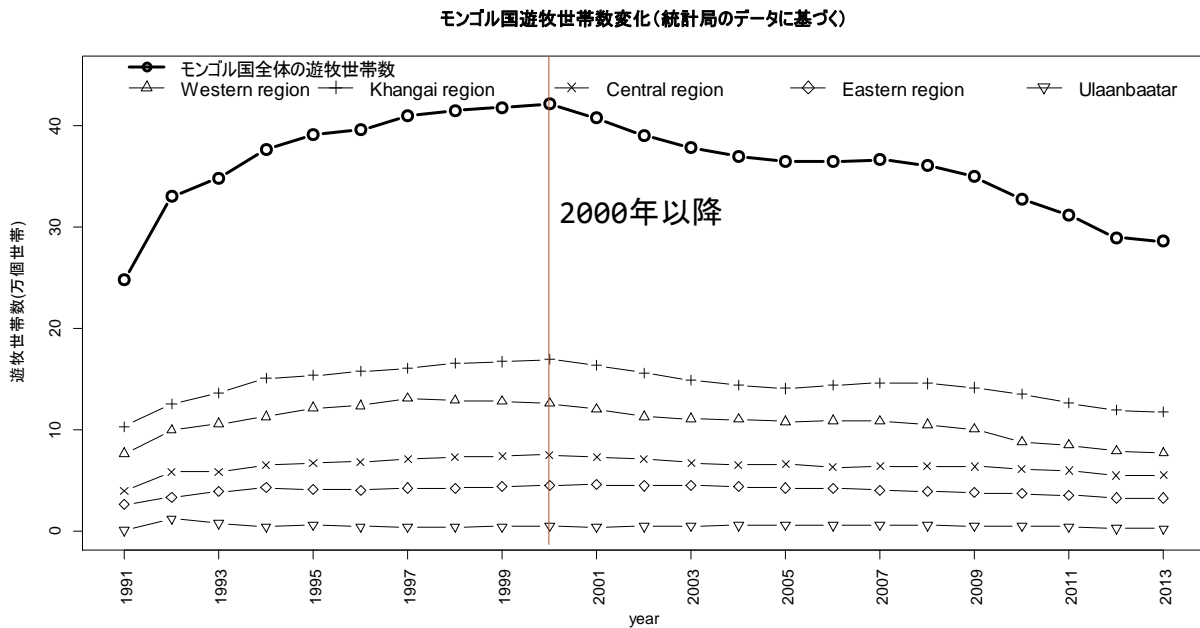
モンゴルにおける家畜頭数の変化



図(1)-24 モンゴル全土の家畜頭数の変化

モンゴルにおける牧畜の分布特性を解析した結果、ウランバートル周辺域の家畜頭数の増加が顕著であり、首都域に集約する地域性が見られた。また、県レベルでの放牧庄(面積当たりの家畜頭数)が、平均的に低い首都周辺地域を含め一部地域での放牧庄の増加が見られた。1970年代以降、特に1990年代に市場経済を導入してから、モンゴルの家畜頭数が大きく増加してきたことが統計データから読み取れる。しかし、2000-2002年及び2010年の2度に亘る大規模なゾドの発生によって家畜頭数に大きな変動があった。家畜被害の地域分布から見れば、100万頭以上の被害を受けた地域は、ハンガイ山脈エリアにあるバヤンホンゴル県とウブスハンガイ県と西部エリアにあるゴビアルタイ県とザブハン県及び中央エリアにあるウムノゴビ県とトブ県とドンドゴビ県に及んでいたことが家畜統計データ及びゾド歴記録から読み取れる。家畜の分布する地域特性が、ゾド発生域の分布と一致していることが分った。1970年代以降の40年間余りの統計データ及びゾド歴記録等を見ても、このような被害がかつてない程度の記録的なものであったことを示唆している。一方、大きな被害を受けたものの家畜頭数の増加傾向が続いている。一方、家畜頭数全体が増加するに対して、遊牧の世帯数が2000年の40万世帯から2013年の30万以下まで減少し、全体的に遊牧の世帯数が減少傾向であることが図(1)-25で示され、世帯当たりの家畜頭数の増加を反映している。

最後に、牧畜頭数の増加傾向が続いていることと首都地域周辺での集中傾向が明らかであることが分った。また自然災害が農畜産の安定生産及び地域差に大きな影響を与えていることが読み取れた。衛星データの解析から、1990年代初期により草地バイオマス生産量が低下傾向であり、このような変化傾向は、気候変動との関係が大きいと示唆できた。一方で、自然災害の影響が大きい遊牧畜産の管理体制・対応策に課題があると考えられる。



図(1)－25 モンゴル全国の遊牧世帯数の変化

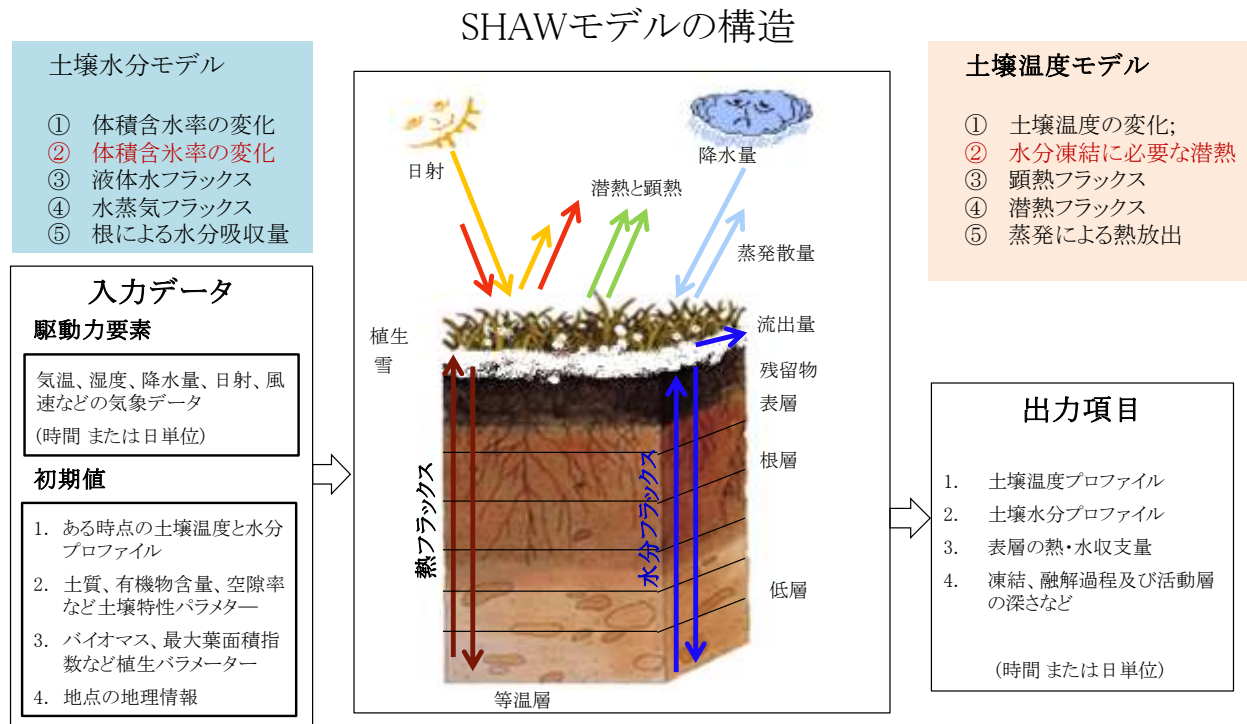
本研究では、干ばつ、ゾドの危険性及び過放牧度など要因を用いて、草原生態系の脆弱性を評価した。その結果、1991年以来モンゴルの草原生態系の脆弱性が、北モンゴル（ボルガン県を除く）と東モンゴルを除く、広範囲に亘って増加した。そのうち、最も脆弱性が高いと見なされた地域はゴビ（ホブド県、オブス県、ドンドゴビ県、ウムヌゴビ県）であることを示した。気候変動に起因して、ゴビ砂漠と中央モンゴルに位置する県では特に、干ばつとゾドの頻度や強度が増し、水資源の減少や砂漠化が進んだ状況に陥った。従って、畜産分野は将来の温暖化気候変動に対して、依然として脆弱のままである。

3) 干ばつ、過放牧と永久凍土の融解の関係解明

既存の研究によると、20世紀の地球温暖化による北半球の永久凍土の融解は今世紀でも続くだろう。永久凍土の融解は、水文、土地被覆及び生態系に影響を与えると考えられる。モンゴルでは、永久凍土がユーラシア大陸の雪氷圏の南端に位置している。温度上昇で始まった永久凍土の融解が異常気象や、人為的な影響によってさらに加速された可能性が高い。本研究は、永久凍土の融解と干ばつ、放牧などの関係を解明するため、ウランバートル付近の典型草原におけるNalaikh サイトで行われた集中観測データを SHAW (Simultaneous Heat and Water) モデル (Flerchinger ら、1998、1991)¹⁸⁻¹⁹⁾に入力することで、凍土融解のメカニズム及びそれと干ばつや過放牧との関係の数値実験を行った。

SHAW モデルは、土壌の凍結・融解のシミュレーションのために開発された1次元モデルである(図(1)－26)。このモデルは地表を覆う植生、積雪、植生残留物及び水と熱交換プロセスをシミュレーションするもので、気候変動のプロセスや土壌凍結・融解、表面流出、地温、土壌水分、蒸発及び蒸散への効果の理解に利用できる。一連のシナリオに基づき、3つの数値実験を実施した。1つ目は、現状の土壌含水量(SWC)と他の3つの乾燥シナリオ(SWC-0.1, SWC-0.2, SWC-0.3)な

ど四つのシナリオにおける干ばつが永久凍土に与える効果を調べた。2つ目は、現在降水量(P)と他の4つの降雨量増加シナリオ(1.25P, 1.5P, 1.75Pと2P)など五つの降水シナリオにおける降水量の変動が永久凍土に与える効果を調べた。3つ目は、放牧なし(草被覆率G)、軽度放牧(-0.25G)、中程度放牧(-0.50G)、強度放牧(-0.75G)、過放牧(-1.00G)など五つのシナリオにおける放牧強度が永久凍土に与える効果を調べた。

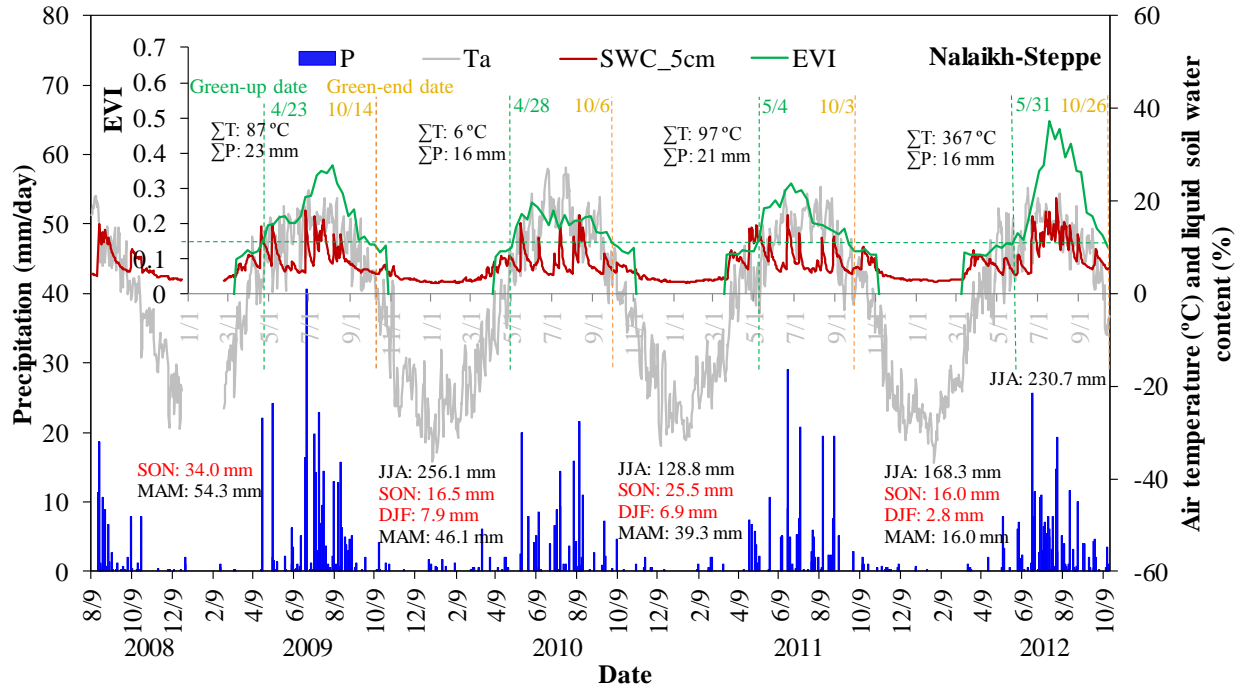


図(1)-26 土壌の凍結・融解をシミュレーションできる SHAW モデルの構造

数値実験は、本研究において、国立環境研究所とモンゴル科学院地理研究所が共同で設置したモンゴルの典型草原を代表する Nalaikh サイト (107.48931° E, 47.6936° N) で得られた観測データに基づいて行われた。図(1)-27 は Nalaikh サイトに設置された自動気象観測システム(AWS)による2008年8月から2013年8月の気温、湿度、風速、風向、降水量、地表面温度、地温、土壌水分と放射の4成分の30分観測データの時間変化を示したものである。日統計値に集計されたデータはモデルの入力値として使用された。Nalaikh は寒冷・乾燥気候である。年平均気温は-2°Cより低く、年降水量は乾燥な2010年の194.8mmから比較的湿潤な2012年の306.3mmまで顕著な経年変動を示している。

土質に関するパラメータは、地表から深さ3mまでの土壌サンプルを採取し、実験室での計測で得られた。飽和透水係数と比重は、同じ地表から深さ3mまでの土壌サンプルから推定された。植生に関するパラメータを求めめるため、Nalaikh サイトの位置に対応する2008-2013年におけるMOD13Q1(Terra)とMYD13Q1(Aqua)に基づく空間分解能250m、16日毎の改良植生指数(EVI)データをNASAの地球観測システムのサイト(<http://earthdata.nasa.gov/>)から入手した。また、日本の科学技術振興事業団における戦略的創造研究推進事業(CREST)として遂行された「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明」(RAISE)プロジェクトは、2003年にモ

ンゴル草原の 6 サイトの群落高、葉面積指標 (LAI) と地上部生物量を観測した (<http://raise.suiri.tsukuba.ac.jp/>)。本研究は、これらの観測データと EVI の線形回帰式を求め、EVI データから Nalaikh での群落高、葉面積指標及び地上部生物量を推定した。

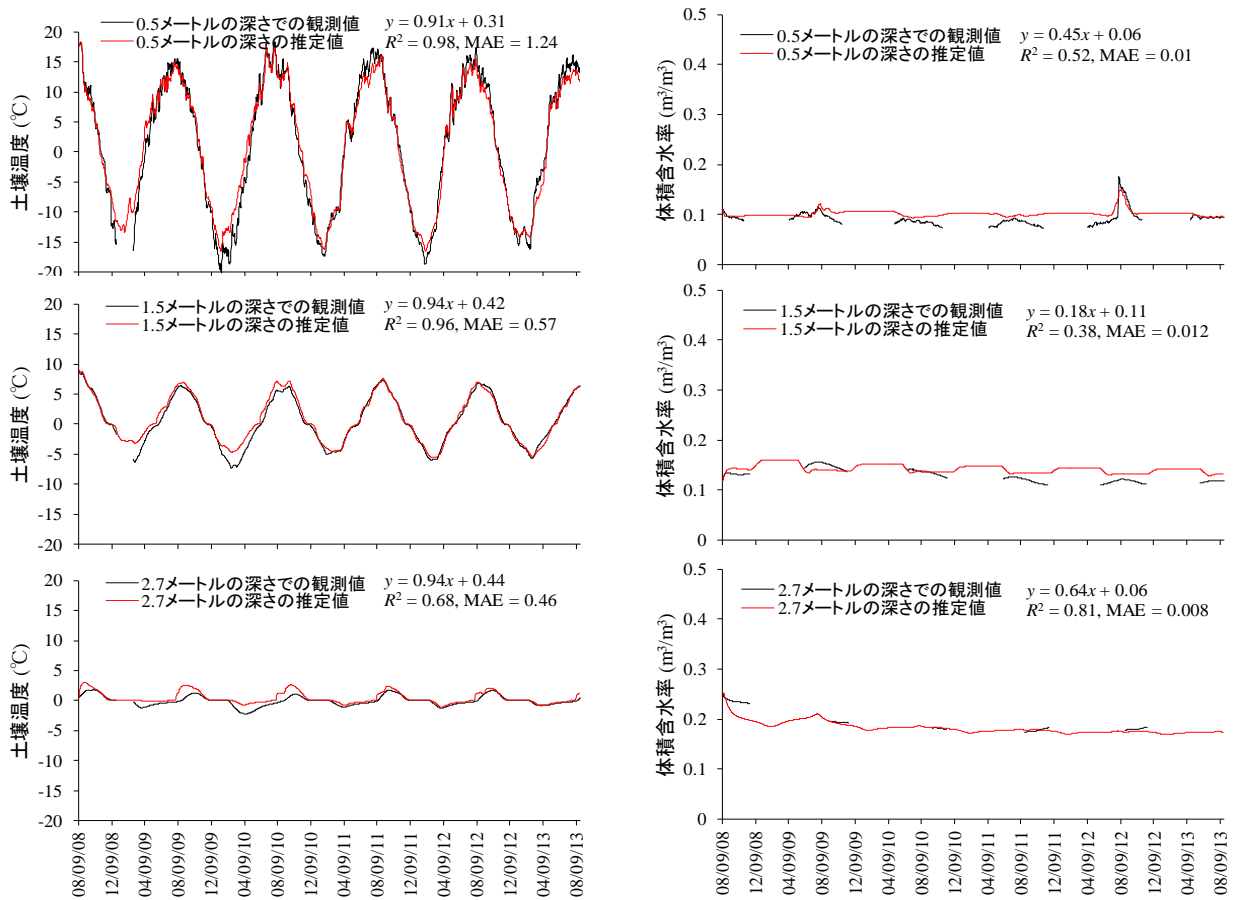


図(1)-27 Nalaikh 草原凍土サイトで観測した気温、降水量、表層の土壌水分量及び植生指数などの経年変化(2008-2012)

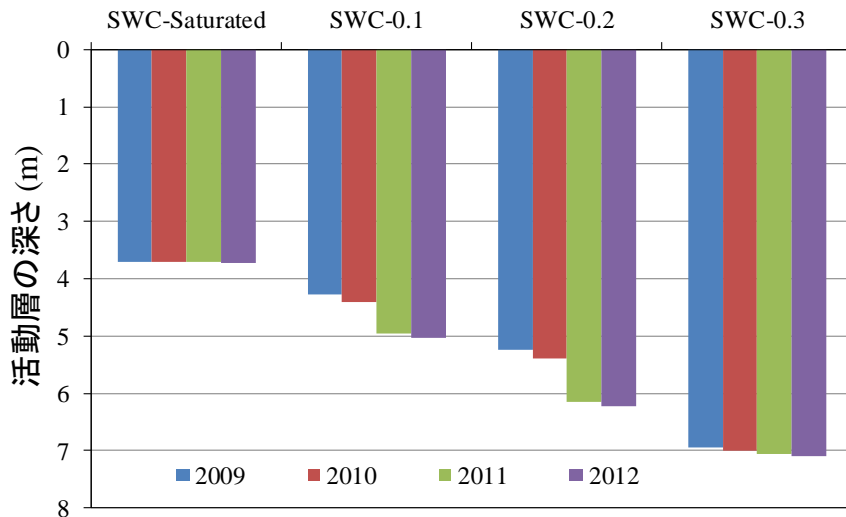
モデルによるシミュレーションを実施する前、Nalaikh 観測サイトの観測データを用いて、SHAW モデルの検証を行った。図(1)-28 は永久凍土の活動層における 0.5m、1.5m と 2.7m の三層における SHAW モデルのシミュレーション結果と実測値と比較結果を示したものである。これによると、SHAW モデルは Nalaikh サイトで精度良く再現可能であることを示された。

干ばつと永久凍土の融解との関係解明

干ばつは、活動層の下部までの土壌の水分損失をもたらすことが分かった。観測サイトにおいては、2009-2012 年は年降水量が年蒸散量を下回る状態が続き、持続した干ばつによって水分損失が毎年続いた。観測値は深さ 2.0-2.7m の土壌含水量が 2009 から 2012 年まで徐々に減少していたことを示した。したがって、活動層の水分状態は干ばつ強度の目安になる。シミュレーションによると、活動層の深さ (ALD) は活動層の土壌含水量の減少に対応して増加した (図(1)-29)。異なる干ばつシナリオによる根系層 (深さ 0-0.5m) の土壌水分と地温の季節変化のパターンの違いはほとんど見られなかった。しかし、根系層の下部から活動層の下部に向かってその違いは次第に大きくなっていった。これらのシミュレーション結果から、干ばつが永久凍土の融解を加速させることを示唆することとなった。



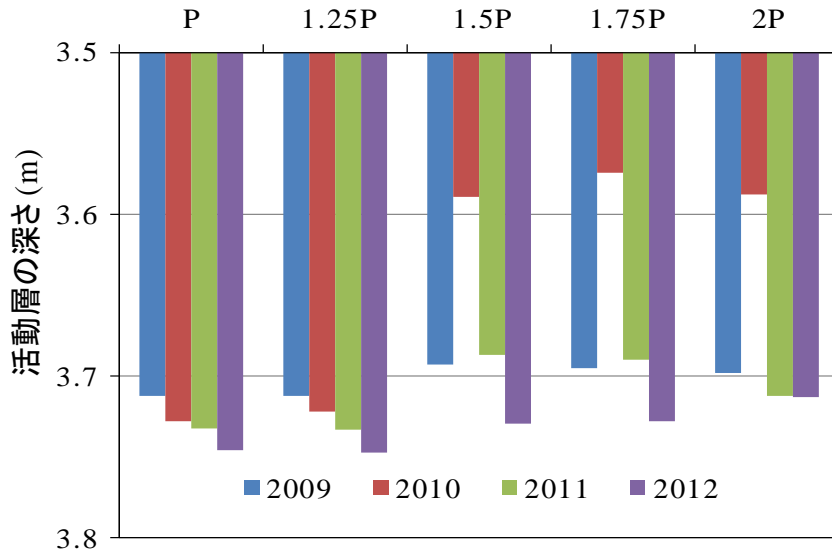
図(1)－28 永久凍土の活動層における0.5m、1.5mと2.7mの三層におけるSHAWモデルのシミュレーション結果と実測値との比較



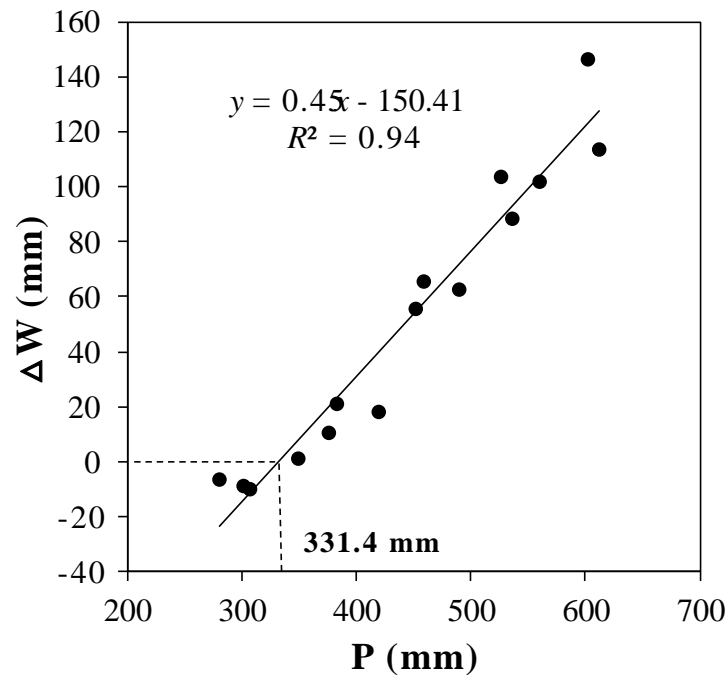
図(1)－29 土壌含水量の減少シナリオに対応した活動層の深さ(ALD)

干ばつによる活動層の年正味水損失は、年降水量が蒸発散を上回るまで続く。本研究では、活動層が降水によって涵養されることを特定するために5つの降水シナリオ(P、1.25P、1.5P、1.75Pと2P)を設定した。ここでは、Pは2009-2013年の実際の降水量である。シミュレーションの結果

によると、1.5P、1.75P、2P の3つのシナリオ時に、土壌全層が涵養され、活動層が浅くなった（図(1)－30）。計算された活動層の水貯留量の変化（ ΔW ）と予測された降水量の線形内挿によると、観測サイトでは、年降水量が331.4mmを上回った時に活動層が水分の涵養機能を働くことを分かった（図(1)－31）。少ない降水量による干ばつは高い地表面温度をもたらさうる。概して、地表の干ばつが活動層の乾燥化をもたらし、その結果、永久凍土の融解につながる。



図(1)－30 降水量の増加シナリオに対応した活動層の深さ(ALD)

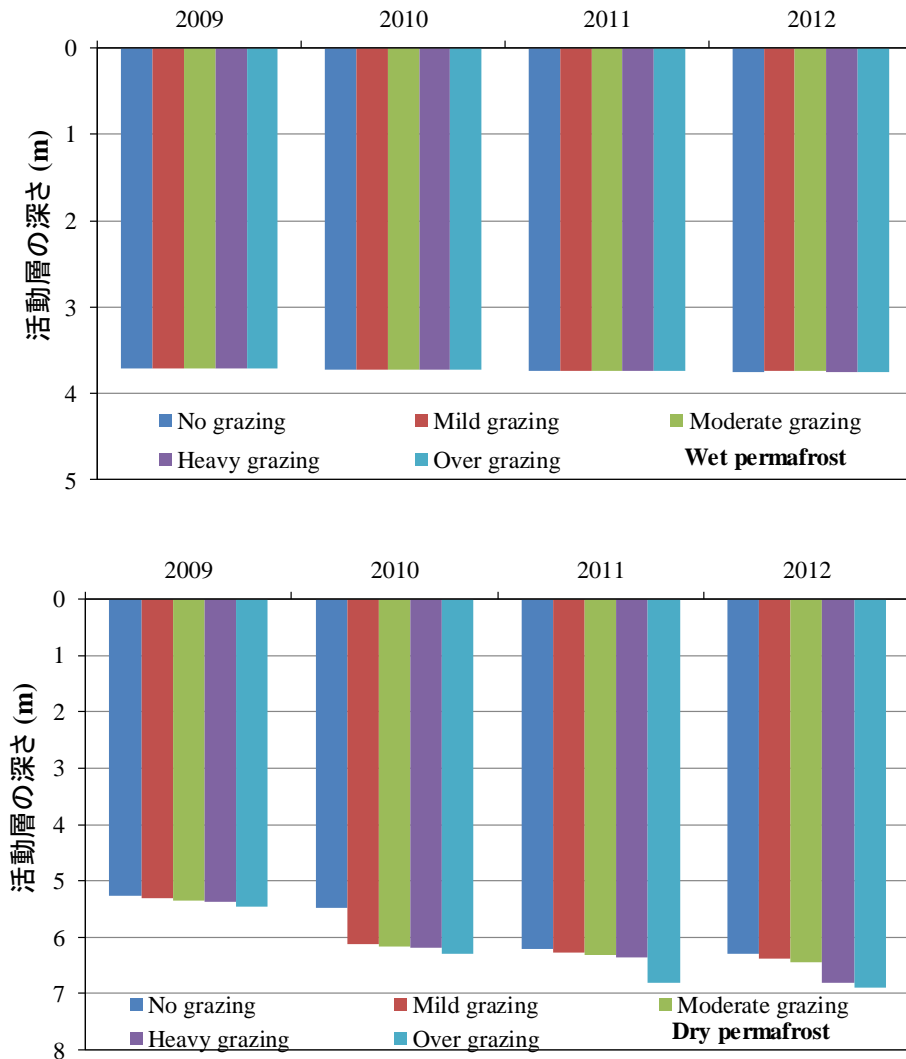


図(1)－31 年降水量と活動層の水分涵養量との関係

過放牧と永久凍土の融解の関係説明

5 つの放牧シナリオ（放牧なし、軽度放牧、中程度放牧、強度放牧、過放牧）における放牧強

度の永久凍土への影響を評価した。湿潤な永久凍土においては、放牧強度は永久凍土の活動層の深さ（ALD）への影響はほとんど見られない。しかし、乾燥な永久凍土においては、強度の放牧はALDを増大させる（図(1)－32）。放牧なしの時に比べて、過放牧はALDを40 cmまで増大させる。放牧強度は根系層（深さ 0～0.5m）の土壌水分を強く規制するが、根系層から活動層下部までの土壌水分量には明白な効果は見られなかった。しかし、乾燥な永久凍土において、放牧強度は下部活動層の地温に著しい効果をもつ。湿潤な永久凍土において、すべての放牧強度に対する深さ3m以下の地温の差が1℃以下である。一方、乾燥な永久凍土において、この差は2℃位に達する。



図(1)－32 放牧強度の増大シナリオに対応した活動層の深さ(ALD)
(上は湿潤な永久凍土の場合、下は乾燥な永久凍土の場合)

これらのシミュレーション結果は、干ばつと過放牧が温暖化と同時に進行すれば、モンゴルの永久凍土の融解をさらに加速させる可能性を示唆する。モンゴルでは、干ばつは気温上昇と同時に発生することがよくあり、そして干ばつは草の生産量の減少をもたらす。Nandintsetsegら²⁰⁻²¹⁾は、1965～2010年のデータから牧草生育期(4-8月)の干ばつの強度と発生頻度が、2001～2010年の間に増加し、その結果、牧草生産が著しく減少したと報告した。

モンゴルでは、概して、1990年代から家畜頭数が増え続け、この増加が2002年からさらに加速し、特に西部とウランバートル周辺で顕著である。家畜頭数の急激な増加は過放牧につながる。干ばつが過放牧と重なり、必然的に永久凍土の脆弱さを増大させるため、永久凍土の融解の適応策として過放牧防止のための家畜管理と干ばつに備えるための水資源管理が必要と考えられる。

上述のように、モンゴルでは、地球温暖化の影響で凍土層の融解と土壤水分の喪失が進んでいる。同時に、所得の増加を求める牧童による過放牧が草原を劣化させている。特に近年では、市場価値の高いカシミヤの生産を目的としてヒツジよりも草原環境への負荷が大きいヤギの飼育が急激に伸びており、草原環境の更なる悪化が懸念される。さらに、大雪害（ゾド）によって家畜が大量死する現象が頻発しており、以前よりも多くの家畜を飼育する事で、資産の損失リスクを回避する畜産農家が増えている。その結果、更なる過放牧とゾドによる被害の拡大という悪循環が懸念される。

上記の悪循環から抜け出し、草原環境を維持しながらモンゴル伝統の放牧を持続させるためには、適正な放牧頭数へと誘導する事及びゾドの発生時の家畜被害を軽減させ牧童の生活を安定させるための方策が必要となる。そこで、下記のように気候変動への適応策が考えられる。

- ・ 気候変動の観測及び予測能力の向上：気候の監視システムを改善すること、データの解析及び解釈の可能性を高めること、及び極端な気候現象と気候条件に関する早期警戒システムを強化することが必要である。
- ・ 永久凍土の融解に強い建築技術の確立：永久凍土の季節解凍深度（活性層）の増加により、モンゴルの北部地域での基本的インフラの整備が課題となっているため、永久凍土の融解に強い建築技術を改善することが必要である。
- ・ 適切な家畜数を維持しうる遊牧民の養育：特に大都市の近くにおいて、現在の状態での家畜飼育は草原の減衰を助長させてしまう。地域の草原生産性に応じて適切な家畜頭数を維持するように遊牧民を教育することは急務である。
- ・ 遠隔地での井戸や給水所の設置による牧草利用の改善：牧草の使用と耕作農業経営を調整するために（おそらくは税金を財源とした手段によって）立法ベースラインを策定することが必要である。家畜税は遠隔地での井戸や水場の整備に支出され、その結果放牧範囲が広がり、放牧圧の緩和につながる。
- ・ 再生可能エネルギーの開発と転換：ゲル用のフィルム太陽光発電システム、太陽光電気井戸システム、永久凍土冷凍システムといった再生可能エネルギー技術は温室効果ガス、スモッグ、及び他の汚染物質の減少に貢献し、持続可能な開発と人々の健康問題のために重要となる。

本研究課題のサブテーマ2においては、これらの適応策のうち、適正な環境容量へ放牧頭数を誘導するための家畜総量規制政策及び放牧地の水資源利用・整備計画の実証研究を行い、政策提言を行った。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究は早期観測ネットワークによる衛星・地上観測データを用いて、モンゴルの永久凍土の融解及びそれに伴う陸域生態系の脆弱性を明らかにした。主に、以下の発見及び新たな知見を得

た：

- ① 過去の気象観測データの解析から、1940年以來、モンゴルの年平均気温は2.1℃上昇したが、降水量は僅かながら減少したことが分った。また、ボーエン比や乾燥指数の解析から、1990年代により乾燥化が進み、特に春季から秋季までの乾燥日数が増大傾向にあることが分かった。さらに、IPCCに関連する五つの大気循環モデル（GCM）（日本のMIROC-ESM、米国のNCAR-CCSM4とNOAA-GFDL-CM3、中国のBCC-CSM1.1及びドイツのMPI-M-ECHAM6）の予測結果によると、今世紀末までにモンゴルの気温も降水量も増加傾向にあり、経年変化の幅も益々大きくなり、将来的に極端な気候現象（干ばつ、雪害、洪水や熱波の持続期間）がさらに強まる可能性が示唆された。
- ② MODIS衛星高次処理データの一つである地表面温度（LST）のMOD11A2及びMYD11A2プロダクト（2001-2012年）を用いて、従来の気象観測による数十キロメートルメッシュより遥かに精度の高い1kmメッシュの永久凍土指数（PMI）を算定し、2000年代の最新の永久凍土分布図を作成した。さらに、IPCC AR5のRCP8.5シナリオの場合の予測結果を入力し、今世紀末10年間（2090-2099）の気温平均値が最大4.1℃上昇した場合の永久凍土分布の予測図を作成した。これによると、本世紀末までにモンゴル北部の海拔の高い山頂以外、連続・不連続的な永久凍土が僅かしか残らないだろう。特に点状的・島状的な永久凍土地域の面積は現在の1/5程度に縮小していくだろうと予測した。
- ③ 熱・水シミュレーションモデル（SHAW）を用いて、温暖化や干ばつ及び放牧強度に対する永久凍土の脆弱性に関する数値実験を行った。その結果、干ばつ時に永久凍土の活動層の底（BAL）から水分が失われることによって永久凍土の融解が加速され、Nalaikh実験サイトでは、年降水量が331.4mm/yrを下回った場合、水の損失が発生した。また、数値実験では、干ばつ、過放牧と気候の温暖化が同時に起きた場合、永久凍土はさらに脆弱になることを示唆した。
- ④ MODIS衛星によるフェノロジーデータ及び気象観測データに基づいて解析した結果、異なる凍土地帯における気候の経年変化に対する牧草のフェノロジーの多様な反応を解明した。その結果、連続的・不連続的永久凍土地帯のステップと森林ステップの生育期の始まり、いわゆるグリーンアップ時期（SOS）も生育期の終わり（EOS）ともに、その他の地域より気温も降水量の経年変化からの影響は小さく、一方で、点状的永久凍土地帯や季節凍土地帯のステップと砂漠ステップのSOSは、気温も降水量の双方からより大きい影響を受けている。さらに、永久凍土地域では、SOSは主に前年の秋の降水量に左右され、つまり、前年の秋季の降水量を貯蔵し、翌年の草原の生育に活かす上で凍土が重要な役割を果たしていることが分かった。
- ⑤ 衛星データを同化した生態系モデルを用いてモンゴル全土の1km解像度の牧草の一次生産量を推定した。それを基に、地形や土地利用、草原の種類や家畜の摂取量等を考慮した環境容量推定モデルを用いて、モンゴル全土の1km解像度の環境容量（家畜収容力）を推定した。さらに、推定した環境容量のソムレベルの集計値と現状の家畜頭数の差による放牧圧の地域分布を明らかにした。これによると、モンゴル中央部、特に首都のウランバートル市周辺地域では、家畜の放牧量が収容力を大きく超え、過放牧していることが判明した。

（2）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省は、モンゴル環境・グリーン開発省との間で、日本—モンゴル双方の環境分野の政策、課題についての紹介や環境分野での課題提示を行い、日モ両国間の国際交流を通じて、モンゴル国における政策等の進行を行った。その一環として、毎年国際会議を設け、「日本・モンゴル環境政策対話」を開催している。本研究で得られた永久凍土融解の将来予測、気候変動に対するモンゴル草原及び牧畜社会の脆弱性評価及び環境容量に基づく過放牧の現状分布などの成果は、平成25年度と平成26年度の「日本・モンゴル環境政策対話」で発信し、モンゴル政府の環境政策に貢献した。

また、本研究により得られた研究成果を国連のアジア太平洋地域適応ネットワーク（APAN）のホームページやフォーラム等を通じて、各国の政府関係者や政策決定者に向けて情報発信を行った結果、知見等の共有を行う事ができた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

日本政府とモンゴル政府は2015年2月10日に日・モンゴル経済連携協定（EPA）を締結した。食肉輸出による高付加価値商品へのインセンティブ付加が、環境容量の維持による草原保全をもたらすと同時に、GDPへの貢献をもたらすという本研究で行ったモンゴル適応策の経済効果の評価で得られた成果が有効に機能する可能性を示しており、結果として日・モンゴル経済連携協定（EPA）の環境政策への効果についても貢献したと考えている。

6. 国際共同研究等の状況

本研究を推進するため、モンゴル科学院地理研究所Ochirbat BATKHISHIG教授の協力によって、24年8月にモンゴルの永久凍土観測システムの設置保守と現地調査を行った後に、関連省庁へのヒアリング調査を行った。調査の際、モンゴル自然環境観光省の対応者は、Badamdorj Purev氏（国家水協議会事務局長）とShijir-Erdene Dolgorsuren氏（環境自然資源部役員）；国家統計局の対応者はErdenesan Eldev-Ochir氏（マクロ経済統計部部長）、Baasanjav Radnaabazar氏（経済統計部部長）とBayarmaa氏（マクロ経済統計課上官）；食料農業軽工業省の対応者は、Munguntsatsal Altan-Ochir氏（作物生産政策実施調整部）であった。

自然環境観光省では、モンゴルの水センサス、水管理体制及び水政策の国家展望などについて聞き取り調査を実施した。その結果、モンゴルでは4年毎に29流域の水センサスを作成し、同センサスには降水量、表流水や干ばつの状況及び水利用量などのデータも収集していることが明らかとなった。ただし、水センサスデータを、日本が利用するには政策的な合意を得る必要があり、これらのデータのアクセシビリティに課題が残った。また、灌漑用水及び工業用水の一部は食料農業軽工業省が管理し、飲料水は建設省の管轄である。その他の水資源、水利用、地下水は自然環境観光省が管理していることもわかった。排水についても自然環境観光省の管轄であるが、下水処理場は建設省もしくは地方政府により管理されている。訪問日が省庁再編の前日で、翌日（2012年8月24日）自然環境観光省は自然・グリーン開発省となり、それに伴い国家水協議会は、同省の管轄から、大統領が直接管轄部門となる計画である事も確認できた。

国家統計局では、モンゴルの産業連関表（以下I0表）を対象を絞って、ヒアリングを行った。モンゴルでは統計法に基づいて、5年毎にI0表の作成を行なっている。公開されている最新のI0表は2005年版で、現在、2010年版の作成を進めており、2013年に公開予定である。モンゴルI0表

の作成方法は、Survey法（Eurostat法）であり、大中小企業あわせて約5000企業への調査に基づいて作成している。産業分類は125部門まで細分化されているが、公開データは35部門に集約されている。モンゴル統計年鑑に使用される際には更に15部門へと集約される。モンゴルでは、地域表の作成を行ったことはない。その理由は、輸入財（移入財）の帰属性の問題が発生するからである。本ヒアリングによって、2005年及び2010年モンゴルIO表の入手ができた。

食料農業軽工業省では、灌漑用水、工業用水などについてヒアリングを行った。それによると、モンゴルの灌漑面積は農地面積の約5%程度。灌漑用水についてデータの取得はおこなっていないが、かなりの量の灌漑用水が使用されているとの意見を聞くことができた。

本研究で得られた成果を発信するため、2012年8月9日に第97回アメリカ生態学会（Portland, Oregon, USA）で、第8回モンゴル高原及び周辺地域の自然資源と持続的発展の国際会議（Ulaanbaatar, Mongolia）で発表され、さらに2013年3月18日～20日に開催されたアジア・太平洋における適応に関する主要な政策決定者、援助機関、実施者が集まる「UNEP Adaptation Forum 2013（韓国 仁川）」において成果を紹介した。

また、本研究により得られた情報や研究成果を基に、平成25年11月18日にワルシャワで開催されたCOP19での国連のアジア太平洋地域適応ネットワーク（UNEP-APAN）サイドイベントにおいて講演「Pathways toward climate compatible development」を発表し、各国の政府関係者や政策決定者に向けて発信した。

さらに、本研究により得られた情報や研究成果は、平成25年12月3日に横浜で開催された文科省・環境省主催のシンポジウム「地球温暖化はどうなるか？－IPCCの最新科学的知見と日本からの貢献－」や、平成26年2月14日に横浜で開催されたIGES主催のシンポジウム「気候変動に関する最新の科学的知見とその総合的な対策について」、及び平成25年8月26－29日にロシア科学院、モンゴル科学院、内モンゴル師範大学及び中国科学院と日本国立環境研究所と共催した「第9回モンゴル高原及び周辺地域の環境と持続可能な発展に関する国際会議」において発表され、科学的知見に基づく適応策について市民、企業、行政の人々への啓発活動を行った。

本研究を円滑に推進するため、2014年1月14日モンゴル科学院地理研究所のDORJGOTOV, D. 所長、BATKHISHIG, O. 教授及び中国科学院寒区乾区環境・工程研究所Ren Li教授らを招へいし、アジアの永久凍土地域の脆弱性調査に関する国際セミナーを主催した。その際に、国立環境研究所の住明正理事長とモンゴル科学院地理研究所DORJGOTOV, D. 所長がモンゴルの永久凍土地帯における脆弱性評価及び適応策に関する共同研究の協定書に署名した。双方は、下記の研究活動を共同で実施することを約束した：

- ・ 気候変動による環境脆弱性のモニタリングシステムの構築
- ・ 永久凍土の融解及びその草原生態系に及ぼす影響の解明
- ・ 牧畜経済の持続的発展及び草地環境保全のための適応策の提言

なお、この研究に参加していた主な海外の専門家は以下の通り：

モンゴル科学院 地理研究所 Ochirbat Batkhishig教授

中国科学院 寒区乾区環境・工程研究所 Tonghua Wu教授

中国科学院 地理科学・資源研究所 Zhigang Sun教授

独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター Eerdeni特別研究員

独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター Qingan Xiao高度技能専門員

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) WU, T-H., WANG, Q-X., ZHAO, L., DU, E., WANG, W., BATKHISHIG, O., DORIGOTOV, B. and WATANABE, M.: Environmental Earth Sciences. 67(7), 1869-1876 (2012)
 “Investigating internal structure of permafrost using conventional methods and ground-penetrating radar at Honhor basin, Mongolia”
- 2) WU, T-H., ZHAO, L., LI, R., WANG, Q-X., XIE, C-W. and PANG, Q-Q.: International Journal of Climatology, (33), 920-930 (2013)
 “Recent ground surface warming and its effects on permafrost on the central Qinghai-Tibet Plateau”
- 3) XIAO, W-W., SUN, Z-G., WANG, Q-X., YANG, Y-H.: Journal of Applied Remote Sensing, 7 (1), 073562 (2013)
 “Evaluating MODIS phenology product for rotating croplands through ground observations”
- 4) SUN, Z-G., GEBREMICHAEL, M., WANG, Q-X., J. WANG, T.W. SAMMIS and A. NICKLESS: Remote Sensing, 5 (10), 4735-4752 (2013)
 “Evaluation of Clear-Sky Incoming Radiation Estimating Equations Typically Used in Remote Sensing Evapotranspiration Algorithms”
- 5) SUN, Z-G., GEBREMICHAEL, M. and WANG, Q-X.: Journal of the Meteorological Society of Japan, 91 (5), 627-638 (2013)
 “Evaluation of Empirical Remote Sensing-Based Equations for Estimating Soil Heat Flux”
- 6) SUN, Z-G., WANG, Q-X., MATSUSHITA, B., FUKUSHIMA, T., OUYANG, Z., WATANABE, M. and GEBREMICHAEL, M.: Hydrological Sciences Journal, 58 (5), 994-1012 (2013)
 “Further evaluation of the Sim-ReSET model for ET estimation driven by only satellite inputs”
- 7) WANG, Q-X. and BATKHISHIG, O.: Journal of Ecosystem & Ecography 4, 140 (2014)
 “Impact of Overgrazing on Semiarid Ecosystem Soil Properties: A Case Study of the Eastern Hovsgol Lake Area, Mongolia”
- 8) SUN, Z-G., WANG, Q-X., XIAO, Q-A., BATKHISHIG, O. and WATANABE, M.: Remote Sensing, 7(1), 360-377 (2015)
 “Diverse Responses of Remotely Sensed Grassland Phenology to Inter-annual Climate Variability over Frozen Ground Regions in Mongolia”

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 岡寺智大: 環境情報科学学術研究論文集, 28, 125-130 (2014)

「モンゴルの電力供給と水需要」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) BATKHISHIG, O. and WANG, Q-X. : Proceedings of the 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Enkh-Amgalan S, Amangul Sh. (ed.). ©Institute of Geography, MAS, Ulaanbaatar, Mongolia, 7-9 (2012)
“Climate Change and its Impact on Soil Degradation in Mongolia”
- 2) WANG, Q-X., WATANABE, M., BATKHISHIG, O., WU, T-H., and LIU, J-Y. : Proceedings of the 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Enkh-Amgalan S, Amangul Sh. (ed.). ©Institute of Geography, MAS, Ulaanbaatar, Mongolia, 111-116 (2012)
“Detecting Permafrost Degradation and Ecosystem Vulnerability in Mongolia using an Early Warning Monitoring Network”
- 3) WU, T-H., WANG, Q-X., ZHAO, L., LI, R., C. XIE, Q. PANG, BATKHISHIG, O. and DORJGOTOV, B. : Extended Abstracts of 10th International Conference on Permafrost. Vol. 4, Hinkel, K.M. (ed.). The Northern Publisher, Salekhard, Russia, 589-590 (2012)
“Permafrost degradation under abrupt warming in the central Mongolia Plateau”
- 4) WANG, Q-X., WATANABE M., BATKHISHIG O., CHULUUN, T., OKADERA, T., YAN, W-L., WU T-H. and LIU J-Y: Proceedings of the IX international conference ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS, 2, 26-29 (2013)
“A Policy Contribution-Oriented Research Project “Vulnerability Assessment and Adaptation Strategies for Permafrost Regions in Mongolia”
- 5) WU, T-H., ZHAO L., WANG Q-X., WU Q-B., LI R. and BATKHISHIG O. : Proceedings of the IX international conference ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS, 63-67 (2013)
“Climate and Ground Temperature Relations at Three Discontinuous Permafrost Sites in Mongolian and Qinghai-Tibet Plateau”
- 6) T. OKADERA, WANG, Q-X., BATKHISHIG, O., and WATANABE, M. : Proceedings of the IX international conference ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS, 2, 30-32 (2013)
“Water for Energy Production in Mongolia”
- 7) SUN, Z-G., WANG, Q-X., WATANABE M., and BATKHISHIG O. : Proceedings of the IX international conference ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS, 1, 89-92 (2013)
“Investigation on relationship of climate change, grassland green-up and permafrost in Mongolian permafrost regions”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) BATKHISHIG, O. and WANG, Q-X. : The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Ulaanbaatar, Mongolia (2012)
 “Climate Change and its Impact on Soil Degradation in Mongolia”
- 2) WANG, Q-X., WATANABE, M., LIU, J-Y., BATKHISHIG, O. and Y. YANG, YMP 16 - Ecological Consequences of Multiple Changes in Asia and Their Implications to Global Sustainability in ESA 97th Annual Meeting, Portland, Oregon, USA (2012)
 “Dynamics of terrestrial ecological indicators in East Asia during last decades”
- 3) WANG, Q-X., WATANABE, M., BATKHISHIG, O., WU, T-H. and LIU, J-Y. : The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Ulaanbaatar, Mongolia (2012)
 “Detecting Permafrost Degradation and Ecosystem Vulnerability in Mongolia using an Early Warning Monitoring Network”
- 4) WU, T-H., WANG, Q-X., ZHAO, L., LI, R., XIE, C., PANG, Q., BATKHISHIG, O. and DORJGOTOV, B. : 10th International Conference on Permafrost. Salekhard, Russia (2012)
 “Permafrost degradation under abrupt warming in the central Mongolia Plateau”
- 5) WANG, Q-X., WATANABE M., BATKHISHIG O., CHULUUN T., OKADERA T., YAN W-L., WU T-H., and LIU J-Y: Proceedings of the 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia. Aug.20-22, (2013)
 “A Policy Contribution-Oriented Research Project “Vulnerability Assessment and Adaptation Strategies for Permafrost Regions in Mongolia”
- 6) WU, T-H., ZHAO L., WANG, Q-X., WU Q-B., LI R. and BATKHISHIG O. : Proceedings of the 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia. Aug.20-22, (2013)
 “Climate and Ground Temperature Relations at Three Discontinuous Permafrost Sites in Mongolian and Qinghai-Tibet Plateau”
- 7) SUN, Z-G., WANG, Q-X., WATANABE M. and BATKHISHIG O. : Proceedings of the 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia. Aug.20-22, (2013)
 “Investigation on relationship of climate change, grassland green-up and permafrost in Mongolian permafrost regions”
- 8) 岡寺智大, 王勤学, BATKHISHIG, O., 渡邊正孝: 日本地域学会 第50回(2013年)年次大会, 同学術発表論文集 (2013)
 「モンゴルのエネルギー供給による水需要に関する研究」
- 9) OKADERA T., WANG Q-X., and BATKHISHIG O.. : 4th Asian Conference on Sustainability Energy and the Environment 2014, Osaka, Japan, (2014)

- “Water for coal production in Mongolia”
- 10) WANG, Q-X., OKADERA, T. WATANABE, M., and YAN, W-L. : The 4th Asia-Pacific Climate Change Adaptation Forum. Kuala Lumpur, Malaysia, (2014)
 “Environmental Vulnerabilities and their Adaptation Strategies in Mongolia”
- 11) WANG, Q-X., YAN W-L., WATANABE, M., BATKHISHIG, O., DORJGOTOV, D. : The 5th Environmental Innovators (EI) Symposium, Session 2: Embracing Change, Building Resilience with Communities. Yokohama, Japan. Jan.15-16 (2014)
 “Land Degradation and Carbon Fixation RDU, E. ction in Permafrost Region of Mongolia”
- 12) WANG, Q-X., XIAO, Q-A., OKADERA, T. WATANABE, M. and BATKHISHIG, O. : IARU Sustainability Science Congress 2014, Copenhagen, Denmark, (2014)
 “Vulnerabilities caused by Climate Change and their Adaptation Strategies in Mongolia”
- 13) WANG, Q-X. : BIT’s 4th Low Carbon Earth Summit-2014. Qingdao, China, (2014)
 “Environmental Vulnerabilities caused by Climate Change and their Adaptation Strategies in Mongolia”
- 14) WANG, Q-X. : BIT’ s 4th Annual New Energy Forum-2014. Sep. 21-23, 2014. Qingdao, China, (2014)
 “Renewable Energy Technologies for Climate Change Adaptation-A Case Study in the Permafrost Region of Mongolia”
- 15) エリデニ, ナチン, 小長谷有紀, 王勤学 : 日本モンゴル学会 2014 年度秋季大会, 岡山, (2014)
 「統計データから読み取るモンゴルの農畜産の変遷及びその地域特性」
- 16) 王勤学, 岡寺智大, 肖慶安, 孫志剛 : 国立環境研究所 公開シンポジウム 2014 「低炭素社会に向けてー温室効果ガス削減の取り組みと私たちの未来ー」, 東京と奈良, (2014)
 「モンゴルの永久凍土の融解による水循環の変動及び炭素吸収量の関係解明」
- 17) 王勤学, 岡寺智大, 肖慶安, 孫志剛 : 第 12 回環境研究シンポジウム 気候変動と科学技術～考えよう地球の未来!～, 東京, (2014)
 「モンゴルの永久凍土の融解による水循環の変動及び炭素吸収量の関係解明」
- 18) 岡寺智大 : 第 28 回環境情報科学学術研究論文発表会, 東京, (2014)
 「モンゴルの電力供給と水需要」
- 19) OKADERA, T. : International workshop on Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia, Tokyo, Japan, (2015)
 “Water for energy production in Mongolia”
- 20) WANG, Q-X., XIAO, Q-A., EER DENI, OKADERA, T. WATANABE, M. and BATKHISHIG, O. : International workshop on Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia, Tokyo, Japan, (2015)
 “CO2 Sequestration by Rangeland in Mongolia”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) SYMP 16 - Ecological Consequences of Multiple Changes in Asia and Their Implications to Global Sustainability in ESA 97th Annual Meeting, August 9, 2012, Portland, Oregon, USA (共催：観客約 40 名)
- 2) The 3rd Environmental Innovators Symposium, December 21-22, 2012, Hiyoshi Campus, Keio University, Japan (共催：観客約 50 名)
- 3) The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau, August 20-21, 2012, Ulaanbaatar, Mongolia (共催：観客約 150 名)
- 4) The 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Aug.20-22, 2013, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia (共催：観客約 150 名)
- 5) International Seminar on Vulnerability Investigation in Permafrost Region in Asia. Jan. 14, 2014, Tuskuba, Japan (主催：観客約 30 名)
- 6) 国立環境研究所 公開シンポジウム 2014「低炭素社会に向けて－温室効果ガス削減の取り組みと私たちの未来－」(主催：国立環境研究所、2014 年 6 月 13 日、東京メルパルクホール、観客約 690 名；奈良県新公会堂、観客約 411 名)にてポスター発表
- 7) 第 12 回環境研究シンポジウム 気候変動と科学技術～考えよう地球の未来！～(主催：環境研究機関連絡会、2014 年 11 月 18 日、一橋大学一橋講堂、観客 400 名)にてポスター発表

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 国連のアジア太平洋地域適応ネットワーク (UNEP-APAN) ホームページ (2013 年 5 月 7 日)
- 2) 全国紙
朝日新聞 (2014/2/27、全国版、1-2頁) 生きるため草原を去った
- 3) 地方紙
宮崎日日新聞 (2015/1/1 20頁) 永久凍土解け地盤緩め
佐賀新聞 (2015/1/1 10頁) 解ける永久凍土
上毛新聞 (群馬県) (2015/1/1 50頁) 急速に解ける凍土
神奈川新聞 (2015/1/1 17頁) 永久凍土解けて温室ガス放出
静岡新聞 (2015/1/1 7頁) 豪雨や凍土融解、影響不可避
下野新聞 (栃木県) (2015/1/3 10頁) 解ける永久凍土
熊本日日新聞 (2015/1/3 20頁) 豪雨、凍土融解…各地で異変
高知新聞 (2015/1/3 32頁) 永久凍土解けて温室ガス放出
山陽新聞 (岡山県) (2015/1/3 14頁) 永久凍土解けメタン放出

東奥日報（青森県）（2015/1/3 16頁）解ける永久凍土
 伊勢新聞（三重県）（2015/1/5 4頁）解ける永久凍土
 京都新聞（2015/1/5 16頁）永久凍土が融解 モンゴル・ルポ
 茨城新聞（2015/1/8 12頁）解ける永久凍土

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) UNDP (2007): Human Development Report 2007/2008. Published by the United Nations Development Programme (UNDP). 1 UN Plaza, New York, 10017, USA.
- 2) IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- 3) IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 4) Nelson, F. E. (1986): Permafrost distribution in central Canada: applications of a climate-based predictive model, *Annals of the Association of American Geographers*. 76, 550-569.
- 5) Nelson, F.E. and Outcalt, and S.I. (1987): A computational method for prediction and regionalization of permafrost. *Arct. Alp. Res.* 19:279-88.
- 6) Institute of Geography, Mongolia Academy of Sciences, (2009): National Atlas of Mongolia, ISBN 9789992915439, Published by Gazar zuin khureelen, Ulaanbaatar, Mongolia.
- 7) Cong, N., Piao, S.L., Chen, A.P., Wang, X.H., Lin, X., Chen, S.P., Han, S.J., Zhou, G.S. and Zhang, X.P. (2012): Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: A multiple model analysis. *Agr Forest Meteorol* 165, 104-113.
- 8) Liu, H., Tian, F., Hu, H.C., Hu, H.P. and Sivapalan, M. (2013): Soil moisture controls on patterns of grass green-up in Inner Mongolia: an index based approach. 17(2), 805-815.
- 9) Yu, F.F., Price, K.P., Ellis, J. and Shi, P.J. (2003): Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sens. Environ.* 87(1), 42-54.
- 10) Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Trygg, J., Wikström, C., and Wold, S. (2006): Multi- and Megavariate Data Analysis-Part I Basic Principles and Applications, 3rd ed.; MKS Umetrics AB: Umeå, Sweden.
- 11) Yu, H.Y., Xu, J.C., Okuto, E. Luedeling, E. (2012): Seasonal Response of Grasslands

- to Climate Change on the Tibetan Plateau. *PloS one* 7(11), doi:10.1371/journal.pone.0049230.
- 12) Tserendash, S., B. Bolortsetseg, P. Batiman, G. Sanjid, M. Endentuya, T. Ganbaatar and N. Manibazar (2005): Climate Change Impacts on Pasture, Climate Change impacts. P. Batiman and B. Bayasgalan. Eds., Admon publishing. Ulaabaatar, 59-115.
 - 13) Batiman, P. (2006): Climate Change Vulnerability and Adaptation in the Livestock Sector of Mongolia. A Final Report Submitted to Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC), Project No. AS 06. Published by the International START Secretariat, 2000 Florida Avenue, NW, Washington, DC 20009 USA.
 - 14) Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., and Vidal, A. (1994): Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index, *Remote Sens. Environ.*, 49, 246-263.
 - 15) Wang, Q-X, and H. Takahashi. (1999): A Land Surface Water Deficit Model for an Arid and Semi-arid Regions: Impact of Desertification on the Water Deficit Status in the Loess Plateau, China. *J. Climate*. Vol.12, No.1: 244-257.
 - 16) Mu, Q., F. A. Heinsch, M. Zhao, and S. W. Running (2007): Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 111, 519-536.
 - 17) Mu, Q., M. Zhao, and S. W. Running (2011): Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, Volume 115, 1781-1800.
 - 18) Flerchinger, G.N., S.P. Hardegree, and G.L. Johnson (1998): The Simultaneous Heat and Water (Shaw) Model: A Research Tool for Management Decisions. p. 8.35-8.42. In: *Proceedings of the First Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, NV. Federal Subcommittee on Hydrology, Water Information Coordination Program, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
 - 19) Flerchinger, G.N. (1991): Sensitivity of soil freezing simulated by the SHAW Model. *Trans. Amer. Soc. of Agric. Engr.*, 34(6):2381-2389.
 - 20) Nandintsetseg, B., M. Shinoda, R. Kimura, and Y. Ibaraki (2010): Relationship between soil moisture and vegetation activity in the Mongolian steppe. *Science Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 6, 29-32.
 - 21) Nandintsetseg, B. and M. Shinoda (2010): Seasonal Change of soil moisture in Mongolia: Its climatology and modeling. *International Journal of Climatology*. DOI:10.1002/joc.2134.

(2) 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発と適応策の提言

慶應義塾大学環境情報学部

巖 網林・丹治 三則

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

渡邊 正孝・大場 章弘

平成24～26年度累計予算額：59,359千円（うち、平成26年度予算額：18,751千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、気候変動による影響評価として、SHAWモデルによる凍土の融解解析を行った。解析結果から実証サイトにおいては、過去40年間(1970年～2010年)で凍土の融解が進んだ結果、2000年代半ば以降、凍土からの流出が無くなっている事が分かった。土壌からの水分供給不足は、植物の成長不良及び家畜の生育不良に関連していると考えられ、ゾド発生時には家畜被害を大きくする可能性が高い。草原の環境容量については、SimSAGSによる評価システムを開発した。解析結果から、家畜数が環境容量を大きく超え、過放牧状態であるが判明した。また、同モデルを用いてADBのプロジェクトで設置された水場の適応効果について評価を行った。水場を新設する事により、特定の牧草地への過剰な負荷を軽減する事が確かめられた。環境劣化と家畜被害の関係を評価するための牧畜社会の脆弱性評価については、干ばつ・ゾド指標に家畜の草摂餌量及び干し草収穫量の指標を加えた新しい脆弱性指標の開発を行った。開発した脆弱性指標と家畜減耗率の関係から、指標値が0.2を超えると家畜減耗率が増加する事を初めて見出した。適応策による経済的効果については、応用一般均衡モデルによる経済効果評価システムを開発した。経済効果の分析結果から、モンゴルにおける食肉産業においては、食肉処理と流通に関する技術の向上が早急に必要である事が分かった。家畜総量規制政策への提言としては、モンゴルにおける食肉価格の変動に着目した食肉売却による経済的インセンティブを伴った放牧頭数の抑制及び個人所有の家畜数に対する累進課税、及び放牧地への水資源利用・整備計画について検討を行った。政策決定者に向けては、慶應義塾大学に設置されたUNEP-APAN慶應ノードや慶應義塾大学で開催されたAPAN北東アジア年次会議を通じて気候変動に対する脆弱性評価及び適応策の策定に関する情報配信を行った。

[キーワード]

凍土融解、適正放牧頭数、気候変動、脆弱性指標、応用一般均衡モデル

1. はじめに

半乾燥地域であるモンゴルは、温暖化による水資源や草地生態系への影響が顕著であり、気候変動に対して脆弱な地域であると言える。モンゴルにおける気候変動の影響は、永久凍土層の融解及び土壌水分の喪失として顕在化しているが、(独)国立環境研究所が IPCC AR5 の RCP8.5 シナリオに基づきドイツの MPI-M-ECHAM6 モデルの予測値を用いて作成した 2090 年代（気温が 2000 年代の 10 年間の平均より最大 4.1℃上昇）の永久凍土分布においても北部の高い山頂以外、連続・

不連続的な永久凍土が僅かしか残らない結果となっている。永久凍土層の融解に伴う土壌水分の喪失は、草原植生の成長及びその草を餌とする家畜の生育にも影響するため、放牧を主要産業とするモンゴルにおいては、社会、経済に深刻な問題を生じさせる事になる。一方、モンゴルでは市場経済の導入以後、放牧する家畜の急増によって過放牧の状態となっている。増加が著しいのは、羊ではなくヤギであるが、これは、付加価値の高いカシミヤの生産を目的としたものである。カシミヤの生産は、牧童に多くの収入をもたらす反面、草の根まで食べてしまうため草原植生にとっての負荷は羊よりも遥かに大きい。このため、ヤギの飼育によって牧童の収入が一時的に増えたとしても、草原の荒廃が進行すれば牧童達は生産手段を失う事になる。特に、モンゴル特有のゾド（雪害）の発生時には、増えすぎた家畜が大量に死亡する事態となっており、大切な資産である家畜を失った牧童達は、損失を取り返そうと更に過放牧を行うため、草原の劣化が加速度的に進行する事になる。

モンゴルにおける気候変動に対する適応策の策定においては、まず、モンゴルにおける気候変動の影響及び草原がどの程度家畜を養う事ができるのかを定量的に把握した上で、適正な飼育頭数に導くための方法を考える必要がある。また、考案された適応策については、その効果を評価する方法も必要である。

2. 研究開発目的

本研究では、設定された観測サイト及び実証サイトにおいて気候変動要因及び社会・経済要因が環境容量に与える影響評価を行う。また、地域レベルでの環境容量に基づく適正放牧頭数の推定を行うとともに、適正放牧頭数へ誘導するための適応策（家畜数制御、放牧地域の拡大・移動等）、適応技術（放牧地の水資源利用・整備計画等）の適応効果（環境容量維持効果及び経済効果）を評価するための適応策評価システムを開発する。また、家畜総量規制政策への提言を行うと共に、気候変動や適応策に関して UNEP のアジア太平洋地域適応ネットワーク（APAN）等を通じた政策決定者への情報を行う。

3. 研究開発方法

本研究では、気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発を行った。本システムは、気候変動が草原環境に与える影響を評価するための気候変動影響評価、社会・経済的要因が環境容量に与える影響を評価するための環境容量評価、ゾド発生予測に必要な草原の脆弱性を評価するための脆弱性評価、及び適応策の経済評価を行うための経済効果評価による4つの評価システムから構成されている。

まず、気候変動影響評価に関しては、地球温暖化の永久凍土層への影響を明らかにするため、SHAW (Simultaneous Heat and Water) モデルを用いた評価システムの開発を行い、検証を（独）国立環境研究所とモンゴル科学院地理研究所が共同で設置したNalaikh試験ステーション対象に実施した。凍土融解解析では、土壌からの流出量変化が草原植生へ及ぼす影響を評価する事が可能になる。

環境容量評価では、過放牧等の社会・経済的要因が環境容量に与える影響を評価するため、SimSAGS モデルを用いた評価システムの開発を行った。本研究では、羊とヤギの頭数と移動面積から家畜の育成にどの程度の牧草地が必要であるのかを調べた。また、本モデルでは、気象以外の要因に

よる家畜頭数や移動パターンの変化を求める事ができるため、適応策の効果についても推定を行う事が可能である。本研究では、ADBが実施した水場の新設による効果について評価を行った。

環境劣化と家畜被害の関係を評価するための牧畜社会の脆弱性評価では、従来からの気温と降水量に基づいたゾド発生予測に代わる新しい脆弱性指標の開発を行った。モンゴルにおけるゾドは、古くからある気象現象であるが、気候変動や過放牧によって草原環境の劣化が進んだ現在、ゾドの発生時には数百万頭にも上る家畜の大量死が発生する。このような家畜の大量死を防ぐためには、家畜の移動、資料の備蓄または早期の売却や食肉化が有効であると考えられているが、ゾドによる家畜の大量死は、毎年発生する訳ではなく、また被害の程度も地域によって異なっているため、正確なゾド発生予測が求められている。しかしながら、従来からの気象予報に基づくゾドの発生予測精度は高くない。このため、本研究では、気象、摂餌量、飼料による新しい脆弱性指標の作成を行い、家畜の消耗率との関係を明らかにした。

経済効果評価では、適応策の経済的効果を評価するため、応用一般均衡モデルを用いた評価システムの開発を行った。本研究では、草原劣化と気候変動による家畜の大量死（ゾド）が牧畜業への経済的影響を表すものとして、食肉の生産性にマイナスのショックが生じるシナリオ、及び放牧頭数管理と環境容量維持によってゾドの影響が生じないケースについて評価を行った。また、食肉の輸出振興策が実施された場合の影響についてもシミュレーション計算を行った。

本研究では、牧畜社会への適応策の提言として、モンゴルにおける食肉価格の変動に着目した食肉売却による経済的インセンティブを伴った放牧頭数の抑制及び個人所有の家畜数に対する課税について提言を行った。また、放牧地への水資源利用・整備計画として多くの援助機関で行われている水場新設の効果的な配置・選定についての提言を行った。

モンゴルにおける主要産業である牧畜を持続するためには、科学的な知見や有用な情報を政策決定者に対して発信し、政策に反映させる必要がある。本研究では、モンゴル政策決定者への情報発信をUNEP-APAN KEIO-Nodeやシンポジウム等を通じて行った。

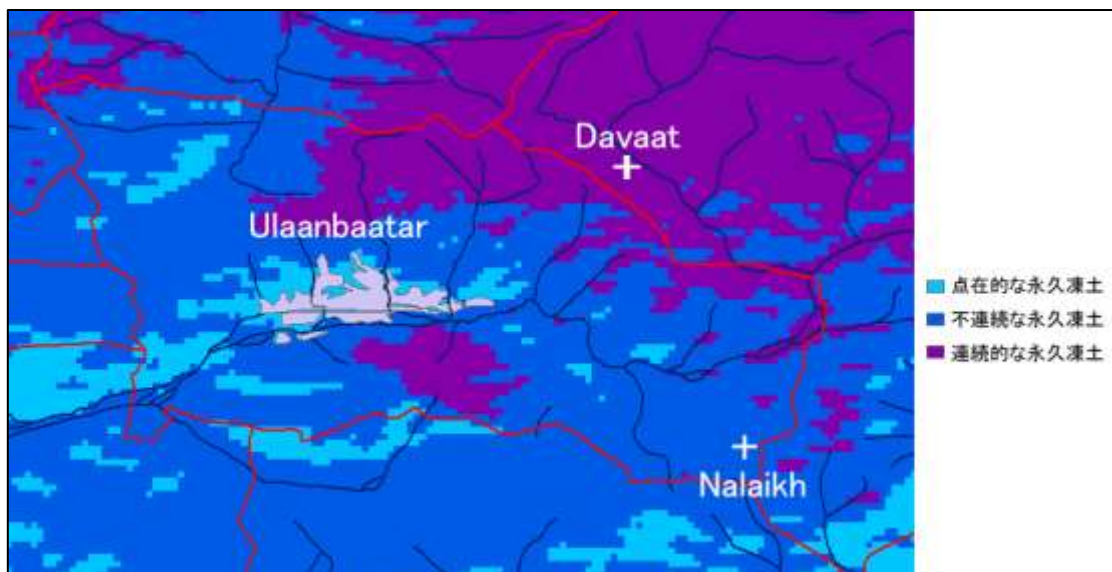
4. 結果及び考察

(1) 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発

1) 気候変動影響評価システム

気候変動が草原環境に与える影響を明らかにするため、SHAW(Simultaneous Heat and Water)モデルによる凍土融解解析を行った。モデルの特徴としては、a)熱・水・溶存物質フラックスを連立して解く、b)土壌の凍結・融解のための詳細な条件を規定、c)複数種類の植物のキャノピーを通して蒸発散と水蒸気移動を計算、d)モデルからの計算結果を用いて、苗木発芽、植物の集合体、昆虫個体群、凍土、浸透、表面流出と地下水浸透を含めて、環境管理と気候変動が生物学的・水文学的過程に与える影響の評価が可能、といった点が挙げられる。

本研究では、モデルの検証を(独)国立環境研究所とモンゴル科学院地理研究所が設置したNalaikh試験ステーション(緯度:47° 41' 37"、経度:107° 29' 21.7"、標高:1,536m)を対象に行った(図(2)-1)。対象の地表面被覆はsteppeであり、地下に凍土層が広がっている。永久凍土分布では不連続的な永久凍土と分類されている。



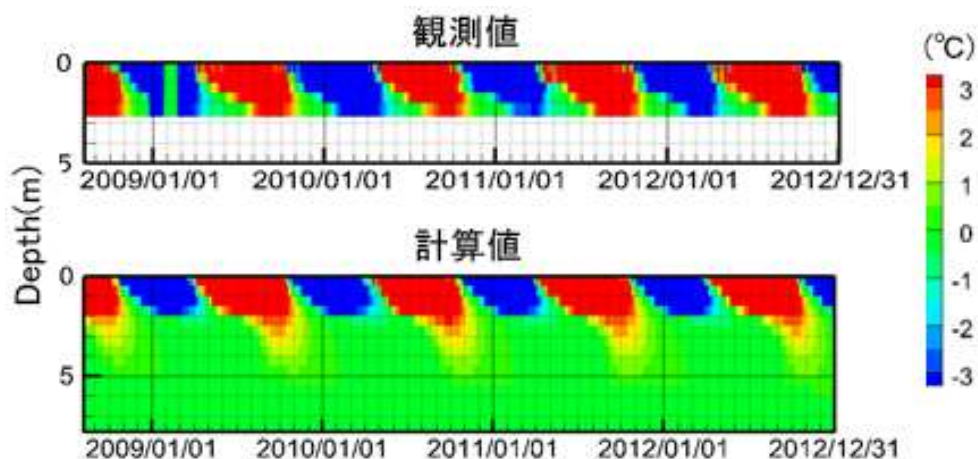
図(2)-1 実証サイト (Nalaikh、Davaat)

計算においては、土壌層を31層（表層付近：地下0m、0.05m及び0.2m、地下0.5mから8m：50cm間隔、地下8mから14m：1m間隔、地下14mから30mまで：2m間隔）に設定した。土壌密度、砂・シルト・粘土割合、有機物割合等は、Nalaikhサイトにおけるボーリング調査から得られた鉛直分布測定値を用いている。

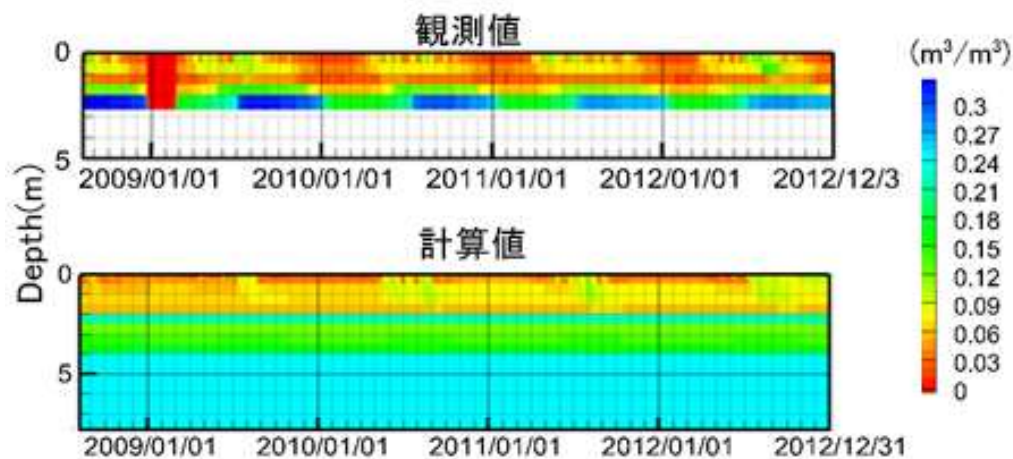
モデル計算では、有機層を1層、積雪総数を0層と設定した。植物パラメータとしては、植物数を1種類とし、1970年から2012年までのTexas A&M大学GLEWSデータの日平均値（牧草高、葉長、乾燥重量、葉面積指数、根の深さ）を与えた。計算ステップ(Δt)は1時間である。土壌温度の初期鉛直分布は、2008年にNalaikhで観測した土壌温度から 0.5°C 差し引いた値を設定した。土壌含水量は全層 $0.3(\text{m}^3/\text{m}^3)$ を初期鉛直分布に設定した。モデル内の雪密度については、自動計算とし、入力データは与えていない。表(2)-1に使用した気象データを示す。また、Nalaikhにおける地温と含水量の観測値と計算値を図(2)-2、図(2)-3にNalaikhにおける地温と土壌含水量の観測値と計算値を示す。

表(2)-1 気象データ

気 温	1970年から2005年は、TexasA&M大学のGLEWSデータの日別の最高気温、最低気温を1時間毎に補完、2006年から2012年までは観測値を使用
風 速	2009年から2012年までの現地観測データを使用
相対湿度	2009年から2012年までの現地観測データを使用
日 射 量	1970年から2012年までGLEWSデータの日積算日射量を1時間毎に補完
降 水 量	1970年から2012年までGLEWSデータの日積算日射量を1時間毎に補完



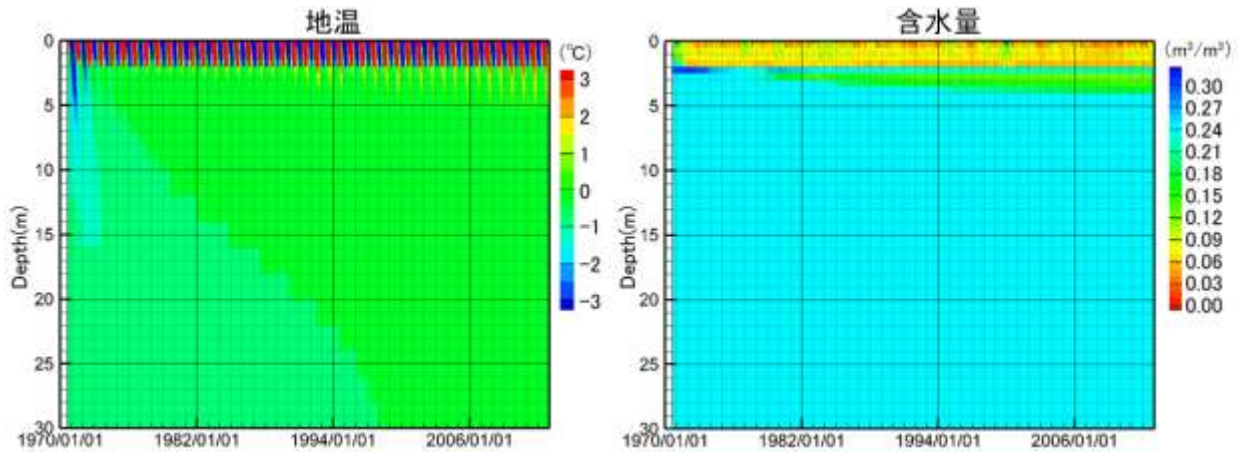
図(2)-2 Nalaikhにおける地温 (2009/1/1~2012/12/31)



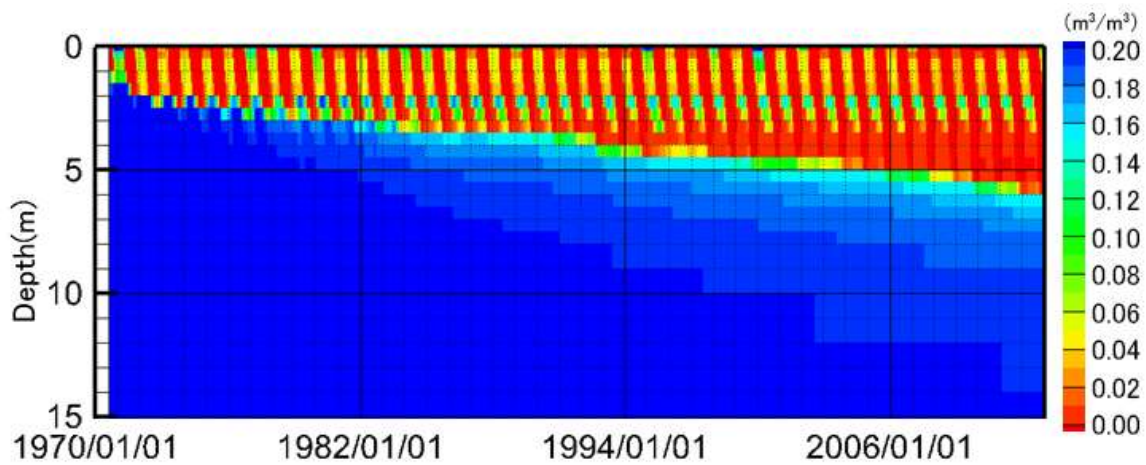
図(2)-3 Nalaikhにおける土壌含水量 (2009/1/1~2012/12/31)

図(2)-2に示す地温については、地下3mまで夏季に地温が上昇する様子等、地温の温度変化パターンを良く再現している事が分かる。また、図(2)-3に示す土壌含水量についても表層から1.5mまでの乾燥状態や2m層の含水層等、観測結果を良好に再現している。この2m層における水は、凍土層よりも下に移動できない水が表層と凍土層との間に貯留されたものと考えられる。

図(2)-4に示す過去40年間の地温と土壌含水量の計算結果からは、夏季における地温の上昇深度が1970年代では2m程度であったものが、2000年以降は4m程度にまで達しており、気候変動による気温上昇の影響が地下に波及している事が分かった。また、土壌含水量については、年々減少しており、乾燥化が進行している事が分かった。図(2)-5に示す凍土割合分布からは、過去40年間で凍土の活動層が地下1m程度から地下6m程度まで増加しており、気候変動の影響が凍土の融解として顕在化している事が示された。

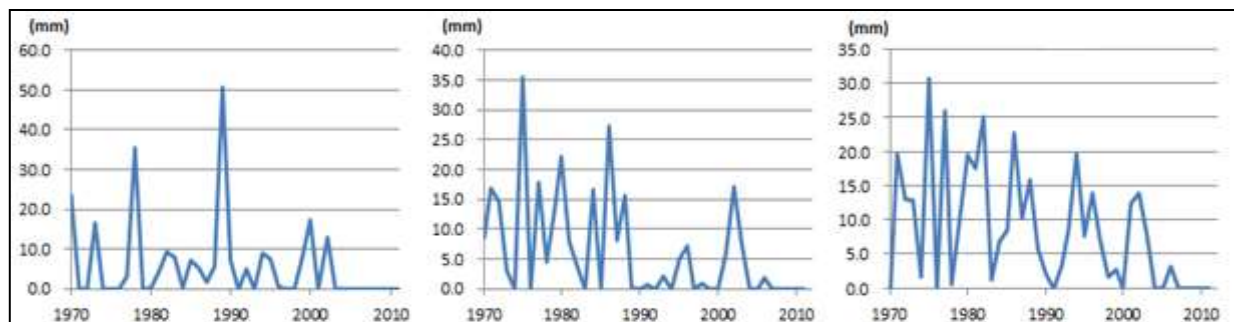


図(2)-4 Nalaikhにおける地温と土壌含水量の計算結果 (1970/8/10~2012/12/31)



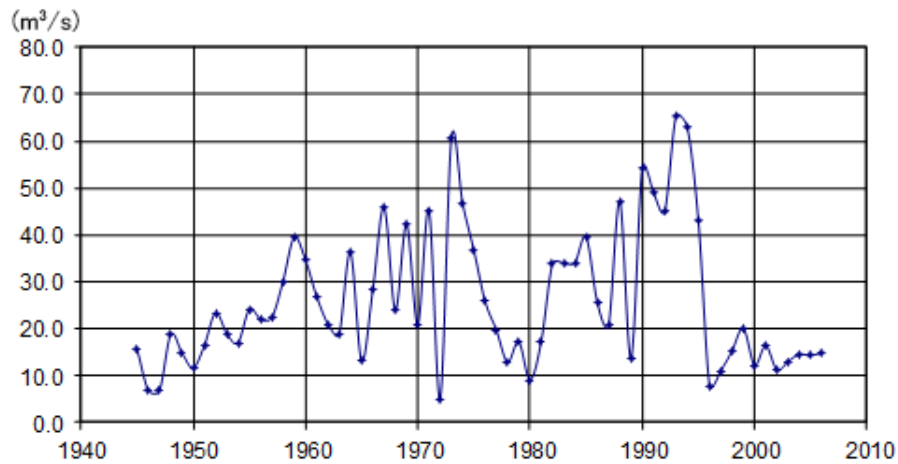
図(2)-5 Nalaikhにおける凍土割合分布

本研究では、Nalaikhにおける凍土融解解析結果を踏まえ、図(2)-1に示すDavaat（モンゴル科学院地理研究所試験ステーション）の2か所を追加し、凍土からの流出量を求めた。Davaatテストサイトは、Davaat-forest（緯度：48° 7′ 58.44″、経度：107° 18′ 21.996″、標高：1,630m）及びDavaat-steppe（緯度：48° 8′ 4.31″、経度：107° 18′ 5.33″、標高：1,643m）の2地点である。過去40年間の流出量計算結果を図(2)-6に示す。



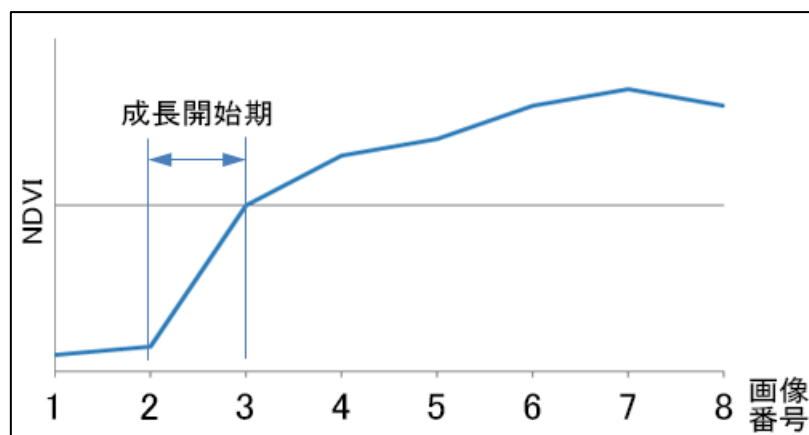
図(2)-6 流出量 (左：Nalaikh、中央：Davaat Forest、右：Davaat Steppe)

凍土融解解析の結果、3つの実証サイトの全てにおいて2005年前後から流出量が無くなっている事が分かった。これらのサイトは、ウランバートル中央を流れるトール河の中上流域に属しているため、凍土層からの流出量が減少すれば、河川流量にも影響すると考えられる。図(2)-7のトール河ウランバートル観測所における河川流量では、2000年頃から減少している事が分かる。

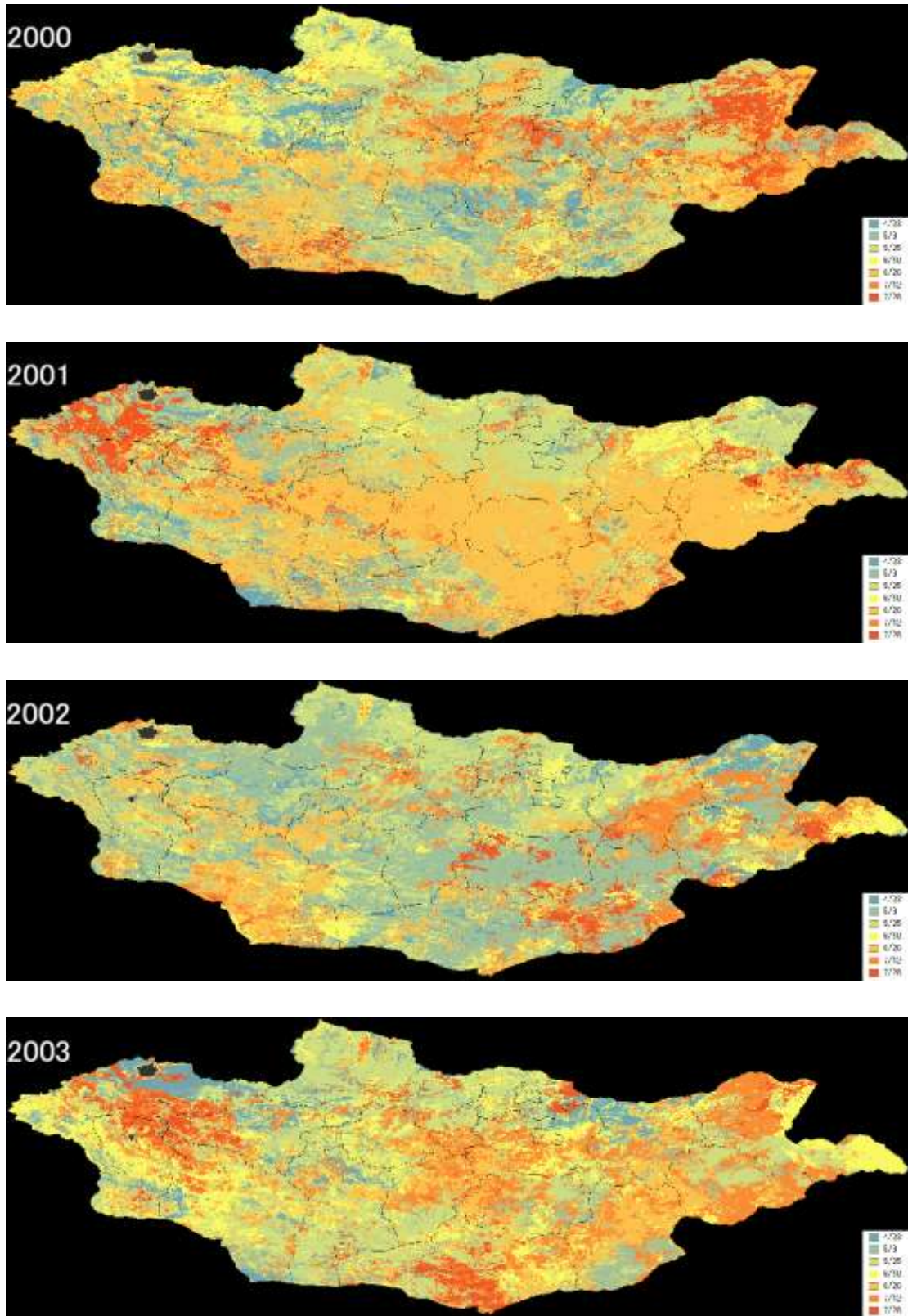


図(2)-7 トール河の河川流量 (ウランバートル観測所)

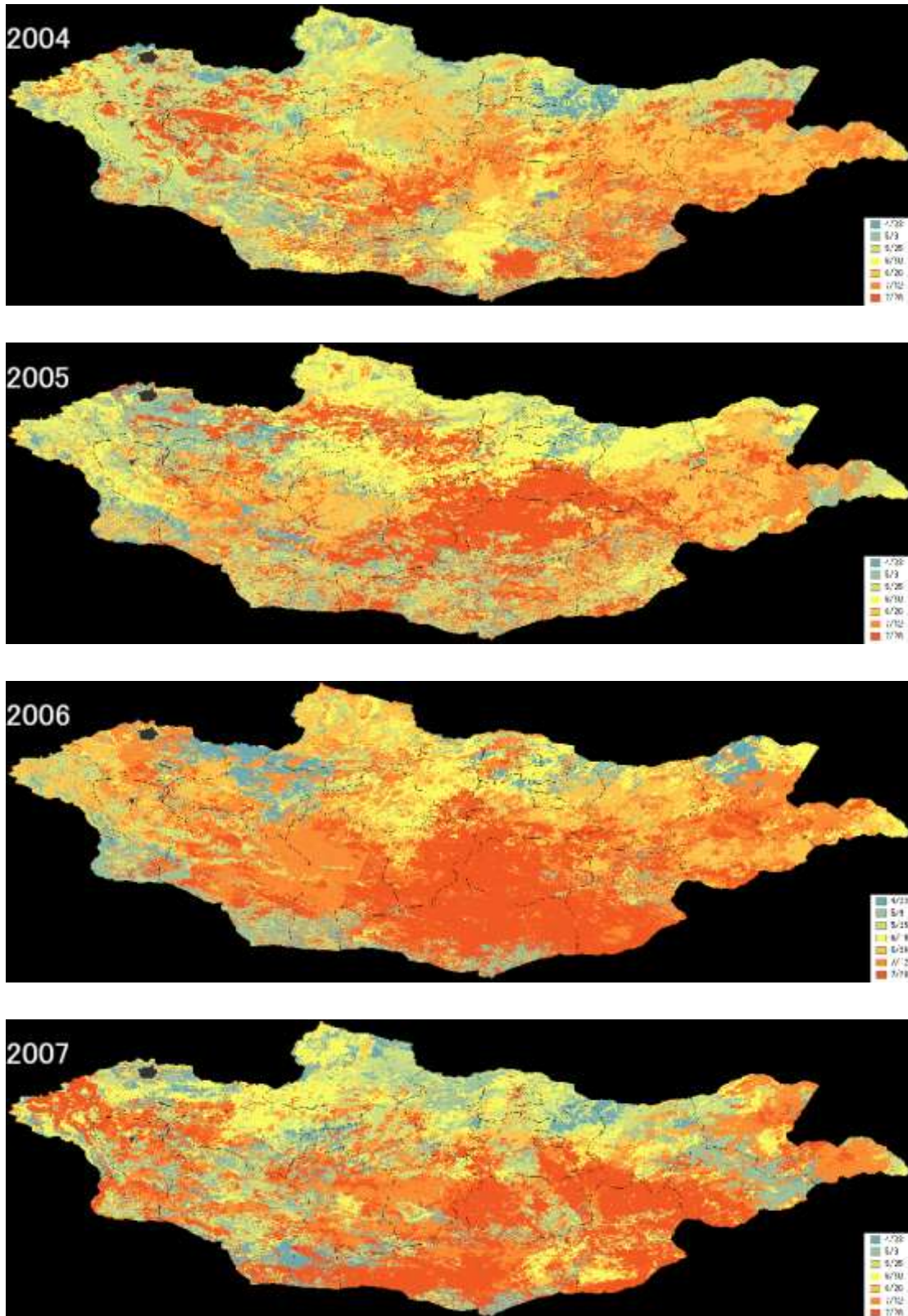
降雨の少ないモンゴルでは、凍土から流出した水分が側物の成長に欠かせない。通常、モンゴルにおける牧草の成長開始期は、4月下旬～5月初旬であるが、近年、牧草の成長開始期が遅れる傾向にあると指摘されている。2月中旬～4月下旬は、羊やヤギの出産・授乳期間であるため、多くの牧草が必要となるが、牧草の成長開始期の遅れは、家畜（特に仔）の生育を阻害する事になる。このため、本研究では、凍土からの流出量の減少が牧草の成長に与える影響について衛星観測データを用いた調査を行った。ここでは、通算日の97日から224日まで16日毎にNDVI（植生指標）画像を合成して作成した8枚の画像を用い、図(2)-8の様にNDVIの値が最も急激に増加した期間を植物の成長開始期として求めた。期間は、2000年から2012年であり、求めた成長開始期を色分け表示したものを図(2)-9a～dに示す。また、Nalaikhにおける成長開始期の変化の傾向について2000年を基準として調べた結果を表(2)-2に示す。



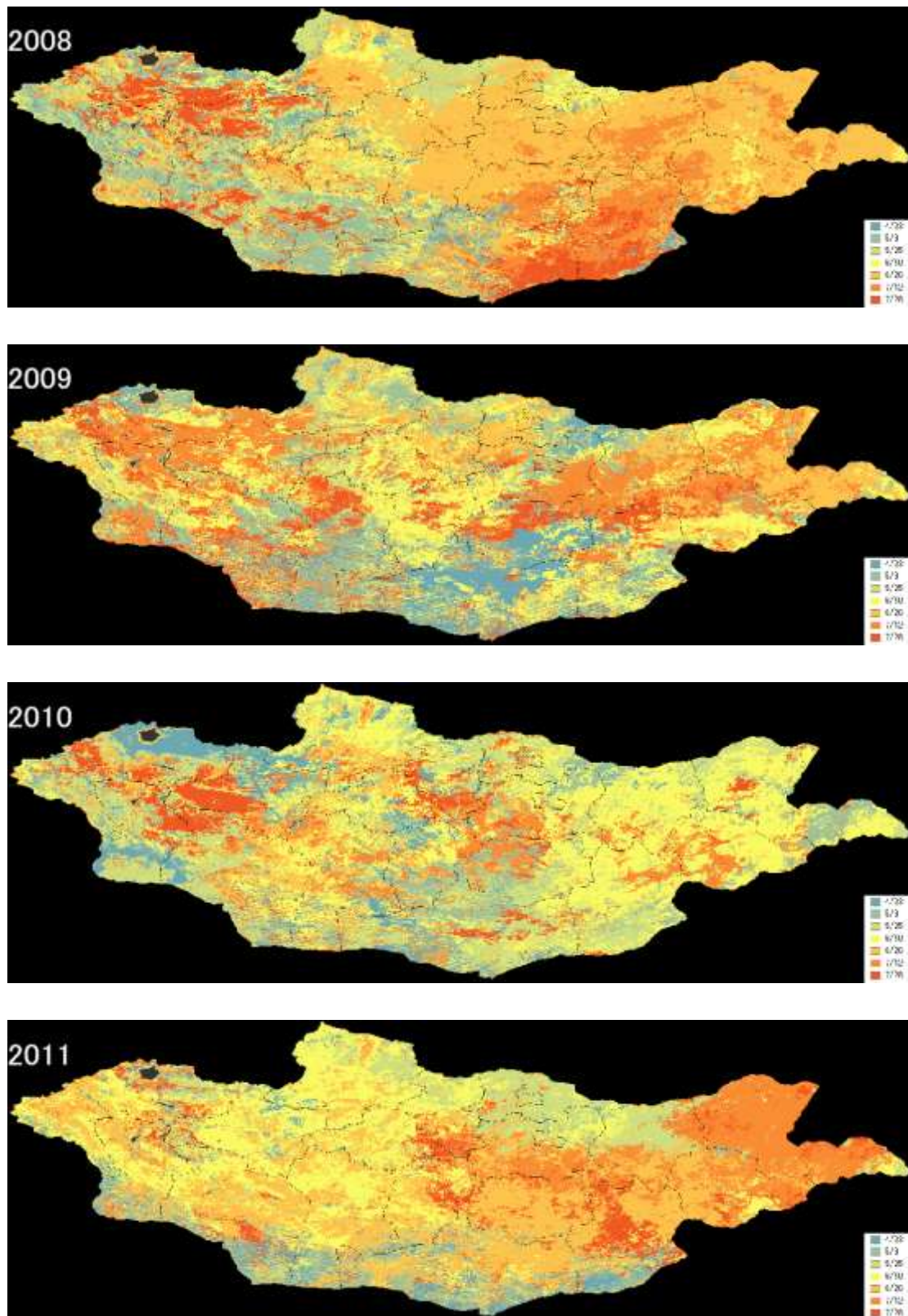
図(2)-8 NDVI値の変化による成長期の判定



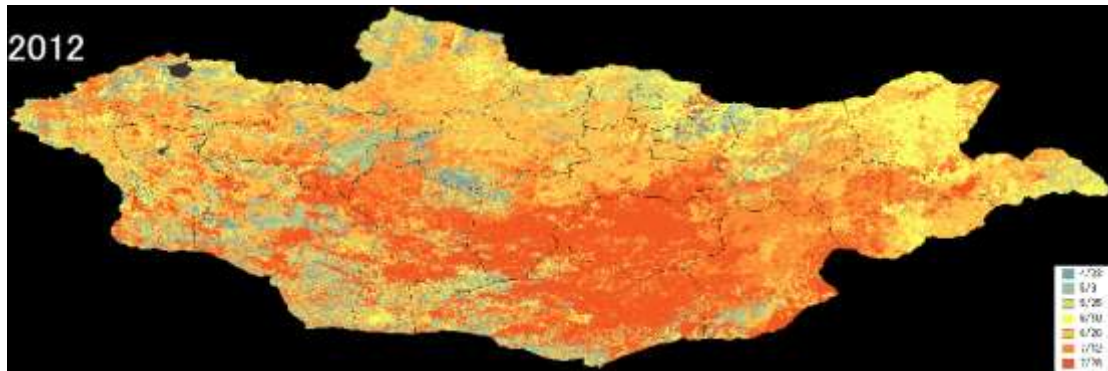
図(2)-9a MODIS NDVI画像から求めた植物の成長開始期（2000年～2003年）



図(2)-9b MODIS NDVI画像から求めた植物の成長開始期（2004年～2007年）



図(2)-9c MODIS NDVI画像から求めた植物の成長開始期（2008年～2011年）



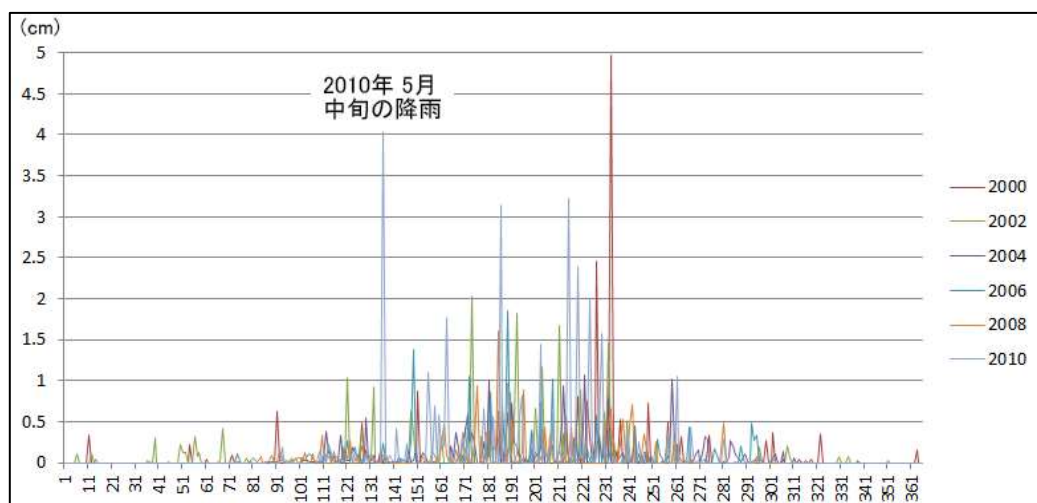
図(2)-9d MODIS NDVI画像から求めた植物の成長開始期（2012年）

表(2)-2 2000年を基準とした成長開始期の変化（Nalaikh）

年	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
成長開始期	遅い	同じ	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	遅い	同じ	遅い	遅い

表(2)-2の結果から、Nalaikhにおける植物の成長開始期は、2000年と比較して遅れる傾向にある事が分かった。この表から成長開始期が基準とした2000年と同時期であったのは、2002年と2010年だけであり、2000年よりも早い年はなかった。ここで、2002年と2010年だけ成長開始期が遅れなかった理由について考える。まず2002年については、図(2)-6から未だ土壌からの水分供給が機能しており、また、2010年においては、5月に纏まった雨が合った事が図(2)-10に示す気象観測データから分かっている。このため、春から初夏にかけて降雨や土壌からの水分供給が無ければ、植物の成長開始期が遅れる事は確かな様である。

このような植物の成長開始期の遅れは、植物の成長不良及び草を食する家畜の生育に影響する。特に、モンゴル特有の気象現象であるゾド（雪害）が発生した際には、家畜の生育不足によって大量の家畜が失われる可能性が高くなる。

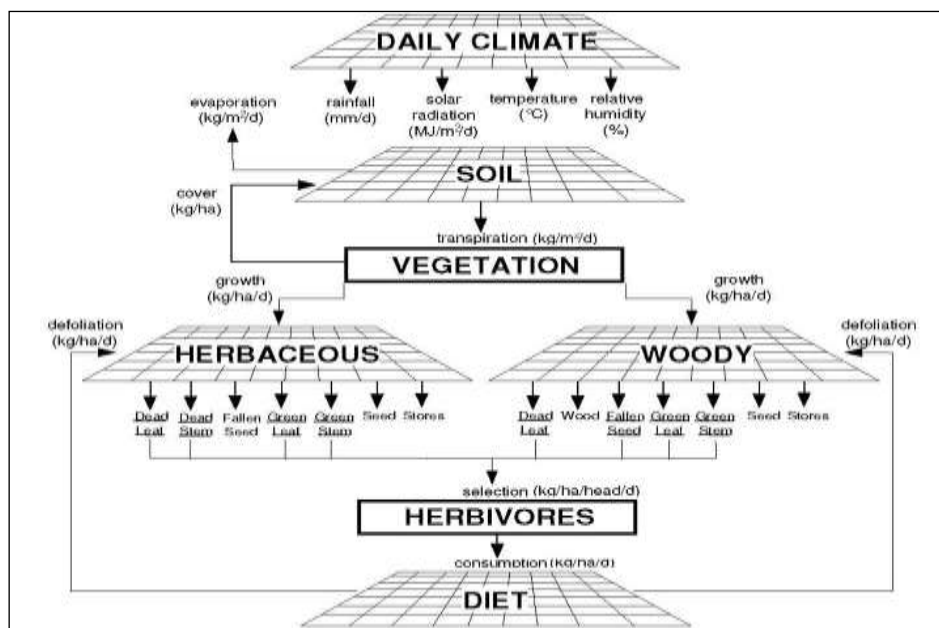


図(2)-10 Nalaikh近郊での降雨量

2) 環境容量評価システム

モンゴルでは、市場経済移行後、所得の増加を求めた牧童によって過放牧が進み、草原環境の劣化が急速に進んでいる。このような社会・経済的要因が環境容量に与える影響について、本研究では、FAOで開発されたSimSAGS(Simulation of a Semi-arid Grazing System)を用いた草原の環境容量を評価するシステムを開発した。

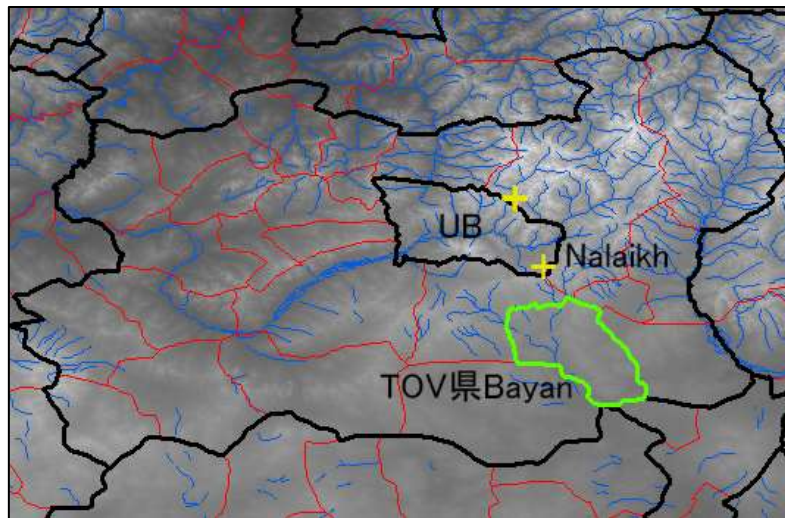
SimSAGモデルは、植生種組成毎のバイオマスと家畜種毎の頭数を土壌データや気候・降水量データ、水場の位置情報等を元に計算を行う事ができる。空間的な不均質性については、グリッド内のセル数の選択により表現し、対象地域を格子状に分割し各格子に地形、気象、植生及び土壌の情報を与える事により空間分布を表現する。隣接する格子への土壌水分の流出や家畜がより摂餌に適した格子に移動する等の格子間で生じる現象を解く事により、家畜の餌探索行動や、水場からの距離に応じた土壌水分や植生の違いを解析に反映する事ができる。本モデルでは、家畜の売却・購入といったマネージメント要素も組み込まれているため、気候条件や空間情報（例えば水場の位置情報等）等の環境変化が家畜システムに与える影響評価や飼料供給の季節変化等を定量化する事ができる。図(2)-11にSimSAGSの構造を示す。本研究では、SimSAGSモデルに解析対象地域の気象観測データや植生データを入力して得られた家畜数、家畜分布から家畜1頭の生育に必要な牧草地面積を算出する。



図(2)-11 SimSAGSモデルの構造

a 環境容量の推定

環境容量の計算をNalaikhサイトに近いTov県Bayanソム（図(2)-12）を対象に1991年4月と2005年4月を起点とした2ケースについて実施した。計算対象とする家畜は羊とヤギであり、個体に関するパラメータは同一（オスの最大体重：28kg、メスの最大体重：23kg、寿命：4年）とした。摂餌行動については、羊は草食、ヤギは草食と雑食の中間とし、摂餌移動距離は1,000m/日、摂餌に伴うエネルギー消費についても考慮した。初期入力パラメータを表(2)-3に示す。また、解析結果を表(2)-4に示す。



図(2)-12 Tov県Bayanソム（緑線で囲まれた部分）

表(2)-3 初期入力パラメータ

		1991年	2005年
植物初期量 (kg/ha)	1年草	215	55
	多年草	1,057	307
	広葉草本	133	34
	灌木	130	33
初期頭数(頭)	ヤギ	5,070	15,962
	羊	32,694	24,646

表(2)-4 解析結果から求めたヤギと羊の環境容量

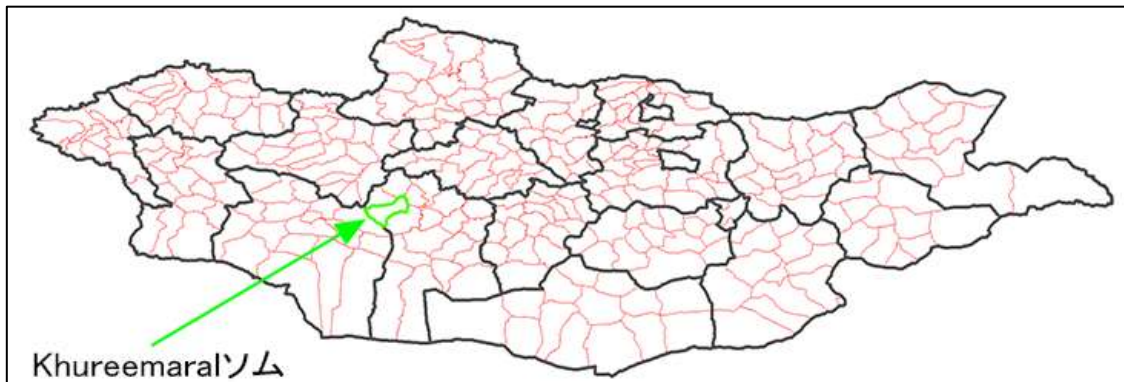
開始年	家畜	解析終了時(1,275日)		
		総頭数	移動面積(ha)	家畜1頭当りの飼育に必要な牧草地(ha)
1991年	ヤギ	5,804	14,290	2.462
	羊	27,590	46,599	1.689
2005年	ヤギ	8,178	31,688	3.875
	羊	18,808	33,551	1.784

解析結果から移動面積を家畜数で割ると家畜1頭の飼育に必要な牧草地の面積が求まる。ここで、家畜の消費量が同じであれば、家畜の飼育に必要な牧草地の増加分は単位面積当りの草の量（環境容量）が減少した事を意味する。このため、解析結果から牧草量の変化を求めると羊については36.5%の減少、ヤギについては5.3%の減少であった。羊に比べヤギの減少は非常に小さいが、これについては、羊とヤギの摂餌行動の違い（ヤギは草の根や木の皮も食べる）等が影響していると思われる。このため、ヤギの飼育に必要な面積が著しく増加すれば、牧草地の荒廃はかなり進行していると考えられる。本解析結果から、対象としたソムは、羊の飼育環境としてかなり劣化している事が分かった。

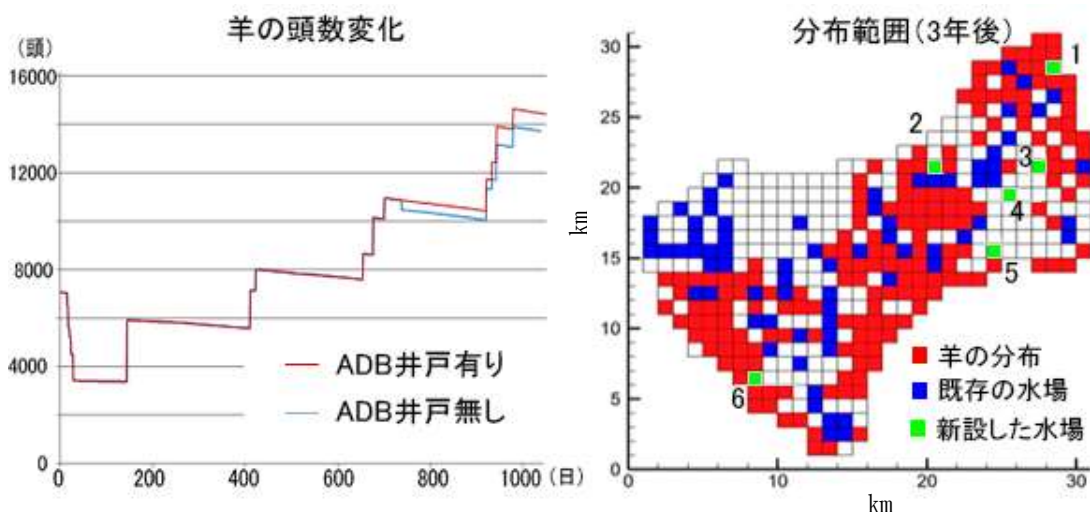
b 適応策の評価

次に、環境容量評価システムを用いて実際の適応策についての評価を行った。対象としたプロジェクトは、ADB(アジア開発銀行)がモンゴルBayanhonger県で実施している“Establishment of Climate-Resilient Rural Livelihoods”である。このプロジェクトには、4つのコンポーネントが含まれており、この内のコンポーネントB (Water points established and managed in project soums) では、既存の水場周辺への過剰な負荷を低減させることを目的に故障して使用できない水場の修復や新しい水場の設置を行っている。本プロジェクトでは、新しい水場の整備により、これまで未利用であった牧草地の有効利用が期待できる。

本研究では、プロジェクトにおける水場新設による効果について図(2)-13に示すBayanhonger県Khureemaraソムを対象にSimSAGSモデルによる解析を行った。計算期間は、1991年を起点とした3年間であり、水場の新設が放牧した家畜の数や分布にどのような影響を及ぼすのかを調べた。図(2)-14に羊の頭数変化と分布範囲を示す。また、水場を新設した場合としない場合における羊の分布面積の違いについて纏めたものを表(2)-5に示す。



図(2)-13 対象地域 (Bayanhongor県Khureemaraソム)



図(2)-14 羊の頭数変化と分布範囲

表(2)-5 羊の分布面積 (3年間)

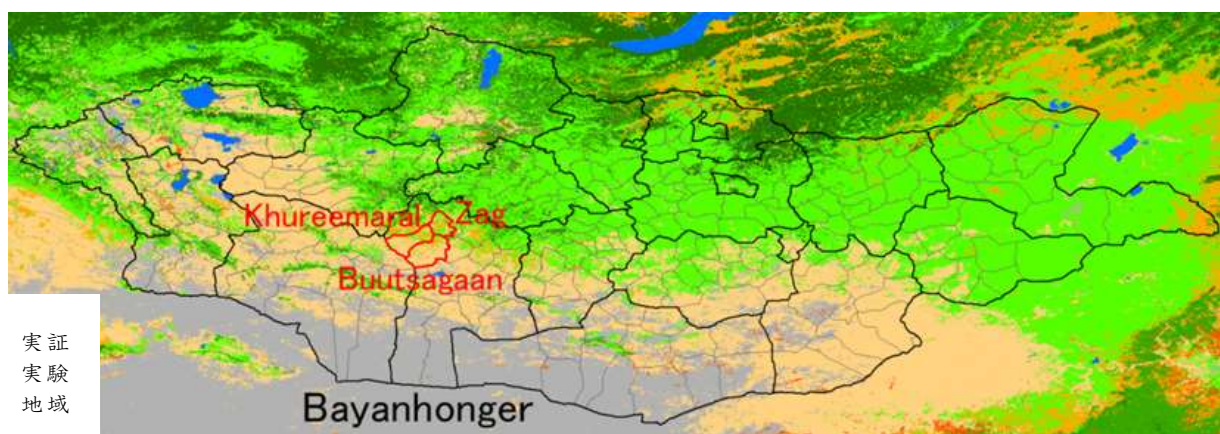
セル数		面積 (ha)		増加量 (ha)	増加量 (%)
ADB井戸なし	ADB井戸あり	ADB井戸なし	ADB井戸あり		
192	210	866,609	947,854	81,245	9.4

図(2)-14の羊の頭数変化からは、3年目頃から水場を新設しない場合よりも家畜数が増加する結果となった。また、表(2)-5の羊の分布面積では、水場を設置する事で羊の分布面積が広がっている事が分かる。しかしながら、図(2)-14に示す羊の分布範囲では、新しく整備した水場である1、6番周辺に羊が分布する反面、3～5番の水場周辺においては羊が少なく、水場の整備による効果が非常に小さい。このため、表(2)-5の結果については、水場を新設した効果だけであるとは言えない。

SimSAGSによるプロジェクト評価結果からは、適切な位置に水場を設置しなければ、期待した効果が得られない事が分かった。このため、適応策の策定等においては、実施場所等について事前によく計画を吟味する必要がある事が分かった。

3) 脆弱性評価システム

近年、モンゴルではゾドによる家畜の大量死が頻発している。ゾドによる家畜の死亡には、夏季の降水量の低下による草の成長不良と餌を十分に得られない家畜の生育不足が関連していると考えられており、ゾド発生予測に基づき、牧草の備蓄や家畜の移動、または早期食肉化を行う事が家畜被害の低減に有効であると考えられている。しかしながら、夏期の気温と降水量による予測精度は必ずしも高いとは言えないため、本研究では、従来のDrought-Zud指標に加え、家畜の草摂餌量及び備蓄飼料(干し草収穫量)を正規化した指標とし、これら3つの指標を用いた脆弱性評価システムの開発を行った。対象地域は、図(2)-15に示すBayanhongor県の3つのソム(Buutsagaan、Khureemara、Zag)である。



図(2)-15 対象地域 (Buutsagaan、Khureemara、Zag)

脆弱性指標 (Vulnerability index)

気象(気温、降水量)データから求まるDrought-Zud indexを構成する気象要素(Summer-T:S-T、Summer-P:S-P、Winter-T:W-T、Winter-P:W-P) 毎の寄与度に差があると考えられるため、気象要

素毎に正規化したインデックスを作成し、摂餌量、飼料、インデックスを加えた6指標の組合せにより脆弱性指標を作成した。指標間の積で脆弱性を表現した場合、極端な気象の場合に1つの指標がゼロとなり、他の指標による修正効果が消されてしまうため、指標間の線形結合による以下の式(4)とした。

Vulnerability index =

$$(\alpha \cdot \Delta N_{norm}^{S-T} + \beta \cdot \Delta N_{norm}^{S-P} + \gamma \cdot \Delta N_{norm}^{W-T} + \delta \cdot \Delta N_{norm}^{W-P} + \varepsilon \cdot \Delta F_{norm} + \zeta \cdot \Delta H_{norm}) / (\alpha + \beta + \gamma + \delta + \varepsilon + \zeta) \quad (4)$$

ΔN_{norm} : 正規化したdrought-dzud index

$$\Delta N_{t,i}^{norm} = \frac{\Delta N_{t,i} - \Delta N_{min}}{\Delta N_{max} - \Delta N_{min}}$$

ΔF_{norm} : 正規化したforage index

Forage index = -(摂餌量) / (家畜頭数)

ΔH_{norm} : 正規化したhay harvest index

Hay harvest index = -(干し草収穫量) / (家畜頭数)

正規化は、過去の最大を1、最小値を0とする

さらに、家畜の大量死は、平年からの偏りが非常に大きい場合に限定される事から、以下の条件で極端な事象のみを抽出し回帰を作成した。

夏季の気温と降水量：

ΔN_{norm}^{S-T} 、 ΔN_{norm}^{S-P} が0.7を超える場合のみ採用、他はゼロとする。採用する場合は、0.7~1.0を0~1.0に再正規化し、採用しない場合と連続的に接続する。

冬季の気温：

ΔN_{norm}^{W-T} が0.7を超え、かつ ΔN_{norm}^{W-P} が0.5未満の場合のみ採用し他はゼロとする。採用する場合は0.7~1.0を0~1.0に再正規化し、採用しない場合と連続的に接続するようにする。これは、冬季の低気温、少降水量を反映している。

冬季の降水量：

ΔN_{norm}^{W-P} が0.7を超え、かつ ΔN_{norm}^{W-T} が0.6を超える場合のみ採用し他はゼロとする。採用する場合は0.7~1.0を0~1.0に再正規化し、採用しない場合と連続的に接続する様にする。これは、冬季の大量降雪、低気温を反映している。以上の条件の下、重回帰分析により係数を求め、 $\alpha = 4$ 、 $\beta = 5$ 、 $\gamma = 23$ 、 $\delta = 33$ 、 $\varepsilon = 4$ 、 $\zeta = 6$ の値を得た。ゾド発生は冬期の気温と降水量が主たる要因であるものの、夏季の気温、降水量、摂餌量、干し草飼料がそれぞれ同等に影響を与える要因である事が判明した。

入力データ

摂餌量データ：

Texas A&M大学による衛星観測と地上観測を組み合わせて推定された家畜の摂餌量データを用いた。また、採用した観測点は、各ソムの中心部付近のものを使用した。

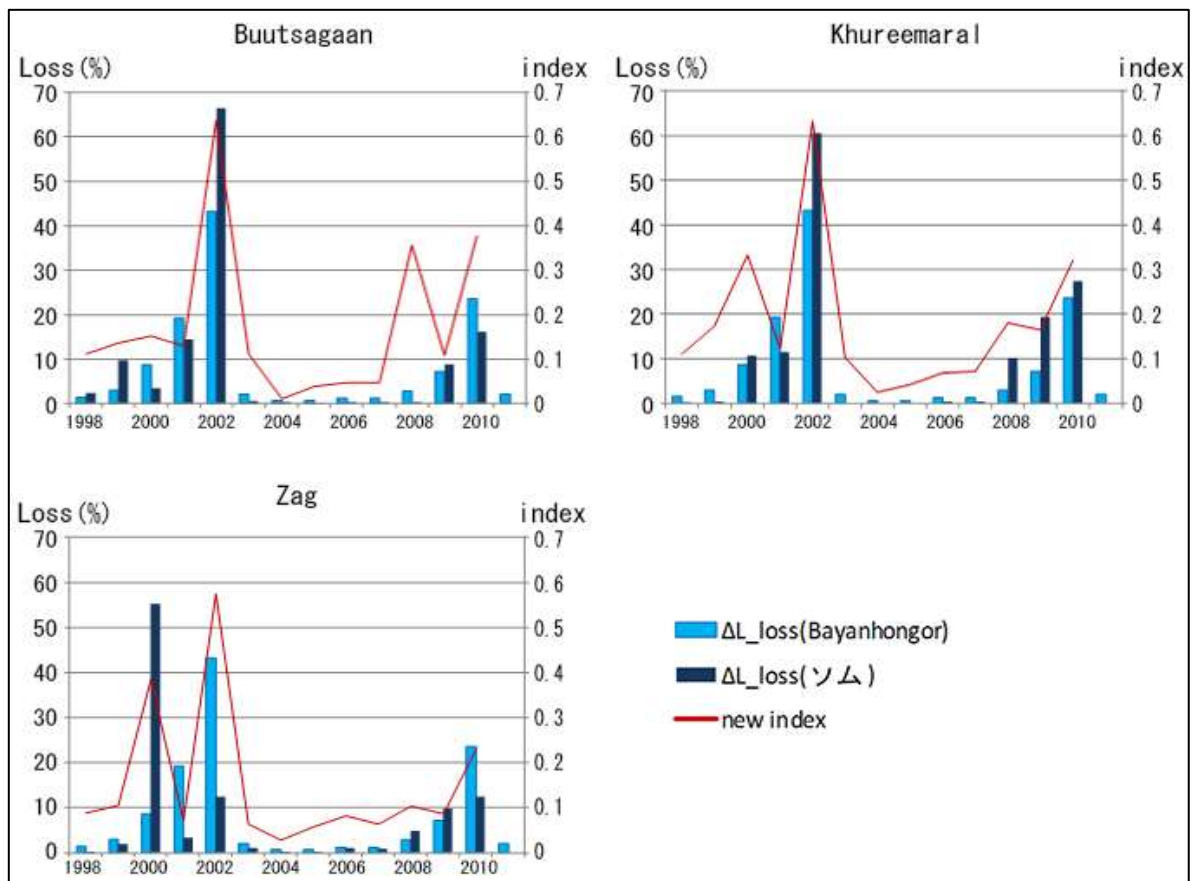
飼料生産量データ：

モンゴル政府による農業統計の内、gross hay harvest and laying-in of fodderの変動を用いた。ただし、ソムレベルでのデータが無いため、県レベルの統計量を用いている。

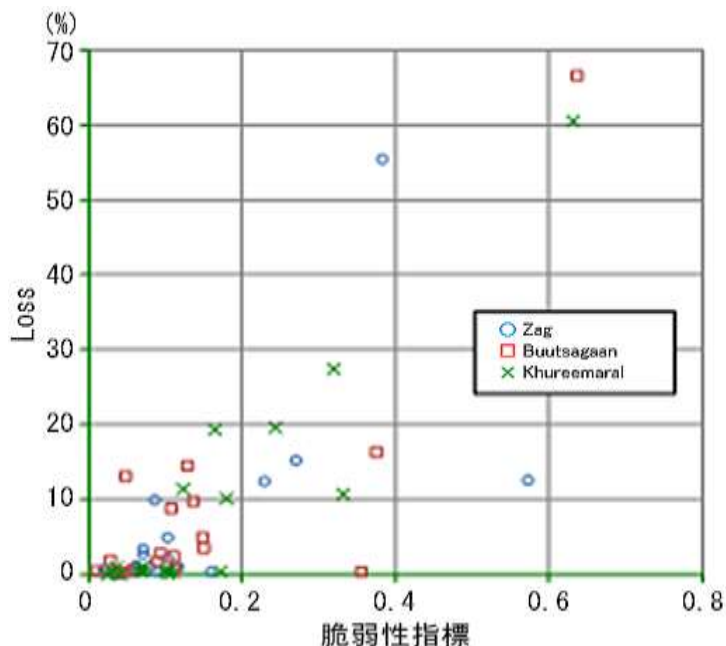
家畜頭数及び死亡数データ：

総家畜頭数は、係数（ラクダ:7、馬:6、牛:5、羊:1、ヤギ:0.9）を用いて全て羊に換算した。

図(2)-16に1998年から2011年における家畜消耗率と新しい脆弱性指標を示す。薄い青色は、Bayanhongor県全体での消耗率を表し、濃い青色は、3つのソム（Buutsagaan、KhureemaraI、Zag）での消耗率を示す。また、図(2)-17に3つのソムでの脆弱性指標と家畜減耗率の関係を示す。



図(2)-16 家畜消耗率と脆弱性指標の推移（1998年～2011年）



図(2)-17 脆弱性指標と家畜減耗率の関係

図(2)-16では、2008年のBuutsagaanソムを除き、新しい脆弱性指標と家畜減耗率との間で非常に良好な対応関係が得られている事が分かる。また、図(2)-17の脆弱性指標と家畜減耗率の関係からは、脆弱性指標値が0.2以上となる場合、10%以上の家畜の大量死がかなりの確率で発生する可能性がある事が判明した。この事から、脆弱性指標に閾値(0.2)が存在する事が明らかになるとともに、脆弱性指標値を閾値(0.2)以下に低減させる事が適応策の目標値として設定し得る事が初めて判明した。また脆弱性を低下させる適応策の具体的数値目標が示された事により、適応策の実施による適応効果を定量的に評価する事が可能となった。

4) 経済効果評価システム

モンゴルを対象として、草原劣化による牧畜部門の生産性低下、もしくは放牧頭数管理と環境容量維持による牧畜部門の生産性増加が経済に及ぼす影響の評価、及び食肉の輸出振興政策が経済に及ぼす影響について評価を行った。これにより放牧頭数管理と環境容量維持政策に基づく生産性向上への経済的インセンティブ及び輸出振興政策による安定的な牧畜産業育成の可能性を検討した。

応用一般均衡モデル (CGE: Computable General Equilibrium)

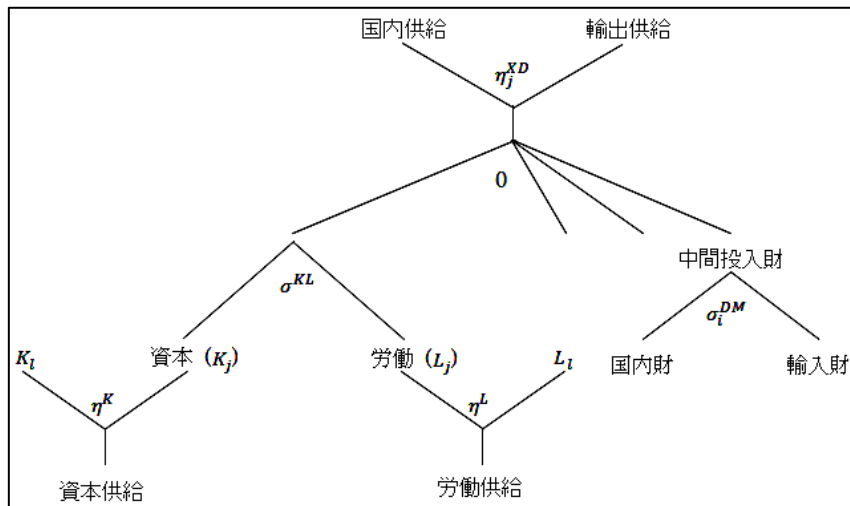
【データ及びモデル構成】

データには2010年のモンゴルの32部門に分割されたI0表(産業連関表)を用いた。農業関連としては、穀物生産、牧畜業、森林・水産業、食品加工、飲料・タバコ業、繊維・皮革産業、木材・製紙・印刷業に分類している。このI0表では、最終需要の項目として、最終消費支出、固定資本形成、輸出、輸入の4つがあり、本モデルでは「最終消費支出」をモデルの「消費」、「固定資本形成」を「投資」として扱う。I0表では民間の消費と政府支出が区別されている事が多いが、2つが「最終消費支出」に統合されているため、モデルにおいても両者を纏めて扱う事にしている。

IO表の付加価値部門の項目については、雇用者報酬、間接税、固定資本減耗、営業余剰・混合所得の4つであり、本モデルでは、雇用者報酬を各部門の「労働への支払い」、営業余剰・混合所得と固定資本減耗の合計を各部門の「資本への支払い」として扱っている。混合所得のデータには労働に対する対価も含まれているため、営業余剰・混合所得を全て資本への支払いとみなす事には問題があるため、今後の改善が必要である。開発した経済効果評価システムでは、モンゴル国を対象とした静学的なモデルであり、多くの部分で標準的なCGEモデルと類似の構造であるが、失業を考慮している点が特徴となる。また、本モデルでは、賃金の調整が十分には行われない短期的な効果を分析する事から、失業が存在するモデルで賃金に下方硬直性を想定するWage curveモデルを採用している。

【生産】

各部門は一次同次の生産関数（規模に関して収穫が一定の技術）を持ち、完全競争の仮定の下、利潤を最大化する様に、投入量と生産量を選択する。図(2)-18に各部門の生産関数を示す。これは多段階のCES関数をツリー形式で表現したものである。各部門の生産関数は資本と労働が代替の弾力性 σ^{KL} のCES関数によって統合され、合成生産要素となる。その合成生産要素とその他の中間投入物が固定比率で投入され、生産が行われるという生産関数である。各部門で生産された財は国内向けに供給されるか輸出される事になる。一国モデルのCGE分析では、国内向けの財と輸出向けの財は不完全代替だと仮定する。生産された財と国内向けと輸出向けへの財の関係はCET（変形の弾力性一定の）関数によって表現されると仮定し、記号 η_j^{XD} が変形の弾力性を示す。



図(2)-18 生産性関数

【需要】

最終需要側を表現するために代表的家計を想定し、資本と労働の生産要素を生産部門に提供する代わりに所得を得て、その所得を用いて消費と貯蓄を行うとする。また静学モデルである事から「貯蓄率が一定」の仮定を置く事で、家計は可処分所得の一定割合を貯蓄する。貯蓄率の値はデータから計算している。家計は可処分所得から貯蓄に回した額以外を消費のために利用する。

家計の効用は消費に依存しており、効用を最大化するように消費パターンを決定する。10表では民間の消費と政府支出が区別できない事から、モデルにおいても二つをまとめて最終消費として扱う。モデルには生産に対する税が存在しているが、その税収は直接代表的家計の所得になると想定している。

【資本と労働の部門間での配分】

家計が生産要素を生産部門に提供している。本研究では、生産要素の部門間の移動がスムーズには起こらない比較的短期の状況を分析するため、生産要素の部門間の移動に制限がかかる状況を想定している。即ち生産の部分で国内向けと輸出向けの財が不完全代替と想定したのと同じ様に異なる部門向けの生産要素が不完全代替であると想定する。またCET関数に従って配分が行われるとする。

【貿易】

貿易についてはモンゴルのみを対象とする一国モデルを使う。更に、モンゴルは交易条件が一定の小国（一定の国際価格の下で輸出入ができる）と仮定する。何らかのショックが生じた場合、輸出量、輸入量が変化する事になるが、貿易収支がデータにおける値から変化しないように為替レートが調整されると仮定する。貿易についてはArmington仮定を置き、同じ財であっても輸入財と国内財は不完全代替であると仮定する。不完全代替を表すために、輸入財と国内財がCES関数を通じて統合されると仮定し、費用が最小化されるように輸入財と国内財の比率が決定される。輸入財と国内財が統合されたものがArmington財であり、中間投入、最終消費、投資に利用される。

【投資】

静学モデルを利用しているので、資本ストック全体の賦存量は外生的に固定され変化しない。貯蓄率が一定という仮定で貯蓄額が決まると想定しており、その貯蓄により（物的）投資がファイナンスされる。投資は産業連関表の「固定資本形成」に当たる部分であり、各財を固定比率で購入する形で投資が行われると仮定している。

【失業】

失業を導入する方法としてwage curveモデルを用いて失業を考慮している。Wage curveモデルは労働組合モデル、効率賃金仮説の考え方に依拠したモデルで、失業率と（実質）賃金率の間に次式のような負の相関関係があると仮定している。

$$w/p = \alpha\gamma^{-\phi} \quad (5)$$

ただし、wは賃金率、pは物価指数、 γ は失業率、 α と ϕ は正のパラメータである。実質賃金w/pと失業率 γ の間に負の相関関係を想定する事で、賃金が伸縮的には動かなくなる。労働需要が減少した場合でも十分に賃金が低下しないため、失業が拡大するという事になる。Wage curveモデルは失業を考慮するためのアプローチとしてCGEモデルでも一般的である。シミュレーションの際には初期均衡における失業率としてIMFの統計から10%としている。

【パラメータ】

生産関数における資本と労働の間の代替の弾力性には全ての部門で0.5、Armington弾力性（Armington統合における国内財と輸入財の間の代替の弾力性）には4、生産における輸出向け供給と国内向け供給の間の変形の弾力性には4と仮定した。資本と労働の配分における変形の弾力性は資本も労働も2を仮定している。

データの特徴

表(2)-6に示す32部門の財別の最終需要、付加価値からは、卸・小売業・自動車等の修理、金属採掘、牧畜、輸送・倉庫業、不動産業等で生産や付加価値の創出が多い事が分かる。表(2)-7に示す牧畜部門における生産財の供給先としては、最終消費（19.5%）、投資（16.9%）、輸出（10.4%）等の最終需要への供給も多いが、食品加工への供給（33.0%）が最も多く、繊維・皮革産業への供給も12.6%と多い。このため、牧畜業の生産性を変化させるシミュレーションを行えば、生産財の変化がこれらの部門へ影響を与える可能性が高い。

表(2)-6 財別の最終需要、付加価値 (2010年)

中間投入	消費	投資	輸出	輸入 (控除)	最終 需要	粗生 産額	付加価 値額
穀物生産	247	103	43	5	-62	88	139
牧畜	727	266	230	142	-7	631	990
森林・水産業	24	19	11	0	0	30	25
石炭石油採掘	75	15	-87	1,112	-19	1,021	643
金属採掘	32	3	40	1,624	-5	1,663	1,091
その他の鉱業、採石	29	1	-2	78	-5	72	48
鉱業支援サービス	305	38	949	11	-74	923	442
食品加工	251	926	120	75	-359	762	259
飲料・タバコ	35	334	56	6	-115	281	169
繊維・皮革産業	183	226	107	149	-264	218	77
木材・製紙・印刷業	159	38	20	8	-126	-61	39
石炭、石油精製品	1,160	174	32	24	-1,308	-1,078	27
非金属・金属製品	631	13	5	62	-394	-314	134
機械設備の製造	572	109	1,000	1	-1,666	-556	5
その他の製造業	68	10	73	2	-114	-29	16
電気、ガス、空調	606	44	3	1	-17	31	168
上下水	129	23	62	1	-107	-21	33
建設業	432	20	881	18	-33	887	311
卸・小売業・自動車 等の修理	716	536	217	558	-21	1,290	1,228
輸送・倉庫業	803	589	13	260	-198	664	735
宿泊、外食産業	110	101	1	107	-84	125	63
情報通信産業	313	206	15	20	-69	172	265
金融業、保険業	325	80	0	19	-54	45	243
不動産業	204	700	1	1	0	701	693
プロフェッショナル、 科学技術サービス	297	32	87	36	-119	35	141
管理業務、 サポートサービス	129	63	0	6	-21	48	85
行政、防衛(社会保障)	123	592	0	0	0	592	438
教育	41	582	0	6	-64	524	387
保健、社会福祉	23	285	3	1	-6	283	174
芸術、娯楽	10	48	0	0	0	48	33
その他のサービス	16	70	0	1	0	70	46
その他の活動	0	0	0	0	0	0	0
合計	8,775	6,247	3,882	4,331	-5,315	9,145	9,145

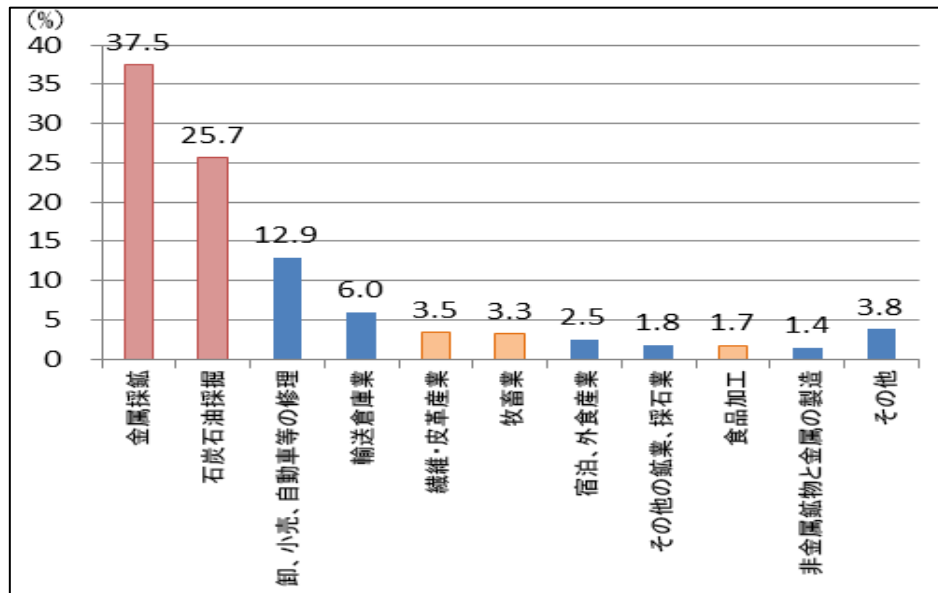
(単位：10億トグルグ)

表(2)-7 牧畜部門の生産財供給先 (2010年)

食品加工	最終消費	投資	繊維・ 皮革産業	輸出	牧畜	穀物生産	その他
33.0	19.5	16.9	12.6	10.4	6.3	1.1	0.3

(単位：%)

次に、図(2)-19に示す輸出に占めるシェアに関しては、石炭石油採掘(37.5%)や金属採鉱(25.7%)部門がモンゴルの主要輸出品であり、牧畜業の輸出シェアは3.3%に過ぎない事が分かる。



図(2)-19 輸出におけるシェア (2010年)

シミュレーションのシナリオ

【牧畜業の生産性変化シナリオ】

ゾド（雪害）による家畜の大量死が牧畜業への経済的影響を表すものとして、牧畜業の生産性にマイナスのショックが生じるシナリオを導入する。牧畜業の生産関数は次の様に表す事ができる。

$$y = \phi f(g(l, k), m) \quad (6)$$

ただし、 y が生産量、 l が労働投入量、 k が資本ストック投入量、 m が中間財の投入量（中間財は一つにまとめている）。この生産関数において、 ϕ は全体としての生産性を表すパラメータであり、シミュレーションではマイナスの生産性へのショックは ϕ の低下、プラスの生産性へのショックは ϕ の上昇で表現される。ここでは、表(2)-8に示す4つのシナリオについて分析する。DP20とDP40はマイナスの生産性ショックによって牧畜業の生産量が低下する効果が生じ、ゾドが発生したケースに相当する。IP20とIP40はゾドの影響が無く、生産が平均的に上昇するような状況と解釈できる。

表(2)-8 牧畜業の生産性ショックのシナリオ

シナリオ	説明	
生産性低下のケース	DP20	ϕ の20%の低下
	DP40	ϕ の40%の低下
生産性上昇のケース	IP20	ϕ の20%の上昇
	IP40	ϕ の40%の上昇

【食肉の輸出振興シナリオ】

モンゴルの食肉は主な生産物の1つであり、主要な輸出品になり得るが、食肉加工技術が低く他国に輸出可能な食肉製品の生産できない事から食品加工部門の輸出はそれ程多くない。食肉加工の技術移転による食肉の輸出増加シナリオ分析は適応策として重要な意味があると考えられるが、現在のモデルでは食肉加工技術の改善をそのまま考慮する事が困難であるため、政府が輸出に対して補助金を拠出する事で輸出を促進する政策として分析を行う。ここでは、表(2)-9に示す3つのシナリオについて分析を行う。

表(2)-9 食肉の輸出振興策

シナリオ	説明
EX1	輸出が5倍
EX2	輸出が5倍、輸出価格が国内価格の2倍
EX3	輸出が5倍、輸出価格が国内価格の3倍

ここでは全てのシナリオで輸出量が基準年の輸出量の5倍になるように補助金を拠出する事とし、輸出価格については、EX1では国内価格と同じ水準、EX2では2倍、EX3では3倍の価格と仮定する。EX2とEX3は、輸出可能な場合、国内よりも海外でより高値で販売する事を意味する。

シミュレーション結果

【牧畜業の生産性低下のケース】

生産性低下のケース（DP20、DP40）における各部門の生産への影響を表(2)-10に示し、マクロ変数への影響を表(2)-11に示す。表(2)-10の結果からは、牧畜、食品加工及び繊維・皮革産業等、生産財である家畜を利用する産業にマイナスの影響が生じる反面、鉱物部門（石炭石油採掘、金属採掘）等では逆に生産が増加する事が分かる。これは牧畜、食品加工、繊維・皮革産業等の生産が減少する部門から生産要素や中間財がこれらの部門に移動するためと考えられる。マクロ変数への影響については、GDP、可処分所得、消費が減少している事が分かる。GDPが大きく減少する要因の一つは、失業率の上昇である。表(2)-11のDP40の結果では、失業率が10%から14%に上昇しているため、牧畜業が比較的大きなシェアを占めるモンゴルにおいては、牧畜業の下流部門である食品加工、繊維・皮革産業に対してもマイナスの影響が大きくなる。

表(2)-10 生産への影響（生産性低下のケース）

部門	生産額 (10億トグルグ)			変化率 (%)		変化額 (10億トグルグ)	
	変化前	DP20	DP40	DP20	DP40	DP20	DP40
牧畜業	1,358	1,073	818	-20.9	-39.7	-284.4	-539.5
食品加工	1,013	831	591	-17.9	-41.6	-181.5	-421.4
繊維・皮革産業	401	251	128	-37.3	-68.0	-149.7	-272.8
建設業	1,319	1,284	1,235	-2.7	-6.4	-35.2	-84.5
鉱業支援サービス	1,228	1,200	1,159	-2.3	-5.7	-28.3	-69.5
行政、防衛（社会保障）	715	700	679	-2.1	-5.1	-15.2	-36.1
教育	564	551	531	-2.4	-5.8	-13.3	-32.9
宿泊、外食産業	235	224	203	-4.7	-13.7	-11.0	-32.2
卸、小売、自動車等の修理	2,006	1,997	1,974	-0.4	-1.6	-8.8	-31.3
不動産業	905	893	875	-1.4	-3.4	-12.6	-30.5
石炭石油採掘	1,112	1,177	1,240	5.9	11.6	65.3	128.7
金属採掘	1,695	1,785	1,870	5.3	10.3	90.2	175.0

表(2)-11 マクロ変数への影響（生産性低下のケース）

マクロ変数	金額（10億トグルグ）			変化率 (%)	
	変化前	DP20	DP40	DP20	DP40
GDP	9,161	8,826	8,399	-3.7	-8.3
労働所得	2,215	2,144	2,050	-3.2	-7.5
資本所得	6,540	6,288	5,976	-3.9	-8.6
要素所得	8,755	8,431	8,026	-3.7	-8.3
可処分所得	10,218	9,869	9,417	-3.4	-7.8
消費	6,247	6,039	5,781	-3.3	-7.5
輸出	4,331	4,339	4,418	0.2	2.0
輸入	5,388	5,396	5,475	0.2	1.6
投資	3,971	3,844	3,675	-3.2	-7.4
失業率(%)	10	12	14		

【牧畜業の生産性上昇のケース】

生産性上昇のケース（IP20、IP40）における各部門の生産への影響を表(2)-12に示し、マクロ変数への影響を表(2)-13に示す。生産性上昇のケースでは牧畜業の生産が大きく増加する反面、繊維・皮革産業、食品加工の生産はそれほど増加しない。生産性上昇のケースと生産性低下のケースでは必ずしも対照的な結果にはなっていない。

表(2)-12 生産への影響（生産性上昇のケース）

部門	生産額(10億トグルグ)			変化率 (%)		変化額 (10億トグルグ)	
	変化前	IP20	IP40	IP20	IP40	IP20	IP40
牧畜業	1,358	1,718	2,183	26.5	60.8	360.5	825.1
食品加工	401	544	653	35.7	62.7	143.0	251.7
繊維・皮革産業	1,013	1,143	1,230	12.9	21.5	130.2	217.6
建設業	1,319	1,347	1,370	2.1	3.9	27.6	51.2
鉱業支援サービス	1,228	1,249	1,265	1.7	3.0	20.8	37.2
行政、防衛（社会保障）	335	347	357	3.4	6.4	11.3	21.5
教育	715	727	736	1.6	3.0	11.7	21.3
宿泊、外食産業	564	573	580	1.6	2.7	9.0	15.5
卸、小売、自動車等の修理	905	914	919	0.9	1.5	8.4	13.5
不動産業	306	312	317	1.8	3.3	5.5	10.1
石炭石油採掘	1,112	1,037	952	-6.7	-14.3	-75.0	-159.4
金属採掘	1,695	1,589	1,469	-6.2	-13.3	-105.5	-225.5

表(2)-13 マクロ変数への影響（生産性上昇のケース）

マクロ変数	金額（10億トグルグ）			変化率 (%)	
	変化前	IP20	IP40	IP20	IP40
GDP	9,161	9,444	9,702	3.1	5.9
労働所得	2,215	2,262	2,286	2.1	3.2
資本所得	6,540	6,770	7,000	3.5	7.0
要素所得	8,755	9,032	9,285	3.2	6.1
可処分所得	10,218	10,500	10,745	2.8	5.2
消費	6,247	6,423	6,579	2.8	5.3
輸出	4,331	4,367	4,435	0.8	2.4
輸入	5,388	5,424	5,492	0.7	1.9
投資	3,971	4,078	4,180	2.7	5.3
失業率(%)	10	9	8		

【輸出振興政策のケース】

輸出振興政策のケースにおける各部門の生産への影響を表(2)-14に示し、マクロ変数への影響を表(2)-15に示す。食品加工部門の輸出を5倍にする政策（EX1）とした場合、食品加工部門の生産は増加するが、他の部門では減少する傾向が見られる。これは牧畜業の生産財が、食品加工の原料として用いられる事により、繊維・皮革産業の生産が減少するためである。同様に石炭石油採掘と金属採掘の生産も減少する。マクロ変数への影響については、EX1ではGDPが減少し、EX2とEX3ではGDPは増加する。即ち、GDPへの効果は輸出価格によって大きく変わるという事を示してい

る。輸出価格が高ければ同じ輸出量に対する収入は多くなり、中間財を多く輸入できる事から生産は増加する。また、可処分所得や消費もGDPと同じ様の動きを示し、輸出価格によって結果は変わってくる。この事から食肉の輸出価格が国内価格と変わらないなら輸出振興政策はマクロ変数を悪化させ、輸出価格が十分国内価格よりも高ければマクロ変数は改善する事になる。

表(2)-14 生産への影響（輸出振興政策のケース）

部門	金額（10億トグルグ）				変化率（%）		
	変化前	EX1	EX2	EX3	EX1	EX2	EX3
食品加工	1,013	1,398	1,405	1,412	38	38.8	39.4
牧畜業	1,358	1,474	1,483	1,493	8.5	9.2	9.9
建設業	1,319	1,301	1,345	1,389	-1.3	2	5.3
穀物生産	335	353	355	357	5.2	5.9	6.5
鉱業支援サービス	1,228	1,210	1,247	1,283	-1.4	1.6	4.5
繊維・皮革産業	401	338	326	314	-15.7	-18.8	-21.8
石炭石油採掘	1,112	1,040	999	958	-5.4	-10.1	-13.8
金属採掘	1,695	1,592	1,534	1,476	-6	-9.5	-12.9

表(2)-15 マクロ変数への影響（輸出振興政策のケース）

マクロ変数	金額（10億トグルグ）				変化率（%）		
	変化前	EX1	EX2	EX3	EX1	EX2	EX3
GDP	9,161	9,037	9,420	9,798	-1.3	2.8	7.0
労働所得	2,215	2,166	2,192	2,218	-2.2	-1.1	0.1
資本所得	6,540	6,669	6,662	6,660	2.0	1.9	1.8
要素所得	8,755	8,835	8,854	8,878	0.9	1.1	1.4
可処分所得	10,218	10,088	10,449	10,804	-1.3	2.3	5.7
消費	6,247	6,168	6,389	6,606	-1.3	2.3	5.7
輸出	4,331	4,321	4,519	4,722	-0.2	4.3	9.0
輸入	5,388	5,378	5,576	5,779	-0.2	3.5	7.3
投資	3,971	3,926	4,088	4,249	-1.1	3.0	7.0
失業率(%)	10	11	11	10			

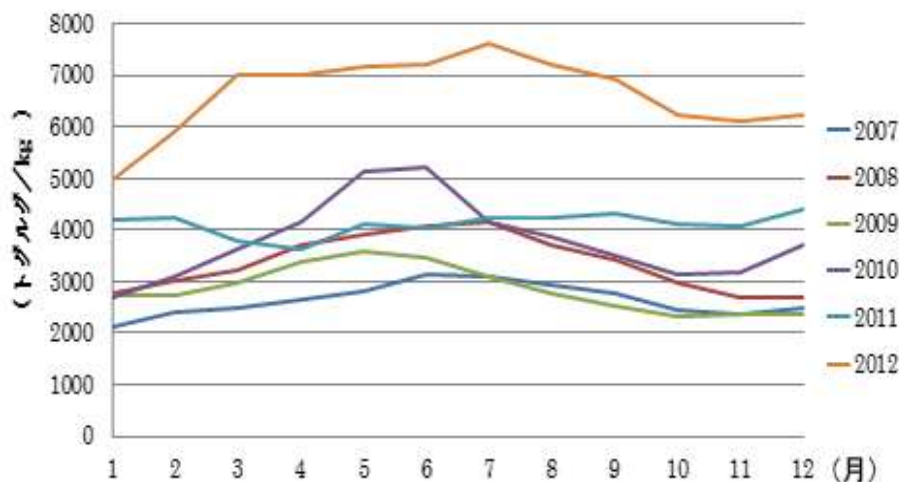
現況、ウランバートル市近郊に食肉流通業者が多く集まり集荷されているが、ウランバートルから遠い地方においては、消費地からも遠いため集荷もスムーズには行えていない。このような地方においては、中国からの業者が市場価格よりもかなり安い金額で家畜を購入する実態が報告されている。この様に国内よりも安い価格で家畜を売却（輸出）する事は、マクロ変数を悪化させる原因になると考えられる。輸出振興策の3つのケースについての分析結果から、国内よりも高値で輸出できる食肉製品の製造技術（食肉処理、加工技術）の向上及び流通システムの整備が必要である事が分かった。

（2）牧畜社会への適応策の提言

1）経済的インセンティブによる放牧頭数の抑制

モンゴルにおける草原環境の劣化には、牧童による過放牧の影響が大きい。しかしながら、牧童に対する何らかの経済的なインセンティブを確保せずに家畜の頭数制限を行う事は、経済的に

貧しい牧童達の反発を招く可能性が大きい。ここでは、牧童に対する家畜の頭数制限を行いながらも経済的な安定が得られるための方策について検討を行う。図(2)-20に2007年から2012年までのウランバートルにおける月別の食肉（マトン）価格の変動を示す。また、同データから年間の最低価格、最高価格及び価格差等について纏めたものを表(2)-16に示す。



図(2)-20 ウランバートルにおける食肉価格の変動 (FAO, GIEWS)

表(2)-16 食肉（マトン）の月別価格

	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
最低価格 (Tg/kg)	2,111.0	2,678.0	2,311.9	2,693.1	3,608.3	4,980.4
最高価格 (Tg/kg)	3,140.5	4,156.0	3,603.3	5,229.3	4,399.6	7,601.8
価格差 (Tg/kg)	1,029.5	1,478.0	1,291.5	2,536.3	791.3	2,621.4
価格差	1.5倍	1.6倍	1.6倍	1.9倍	1.2倍	1.5倍

食肉価格の変動を表した図からは、2011年を除き、食肉の価格は春から初夏にかけて上昇し秋から冬季に下落している事が分かる。このような食肉価格の変動は、モンゴルにおける食肉の流通に起因するもので、家畜は秋に屠畜されるため価格がこの時期最も安くなる半面、春から初夏にかけて在庫が減少するのに合わせて価格が上昇するという仕組みである。

次に、表から年間最低価格と最高価格の差について見ると2007年～2009年では1.5倍程度、2010年には1.9倍、2011年には1.2倍となり、2012年には再び1.5倍程度に戻っている。モンゴルでは、2009年の冬から2010年の春にかけてゾドが発生しており、2010年の価格上昇は、家畜の大量死による食肉供給量不足から生じているものと思われる。2011年に関しては、価格差は1.2倍程度であるが、これは、年間を通じて価格が高止まりしているためであり、前年のゾドによる家畜の大量死が未だ食肉価格に影響しているものと考えられる。2012年については、価格差が以前の1.5倍程度に戻っているが、食肉価格自体は、ゾドの影響が大きい2010年の価格をも遥かに上回っている。

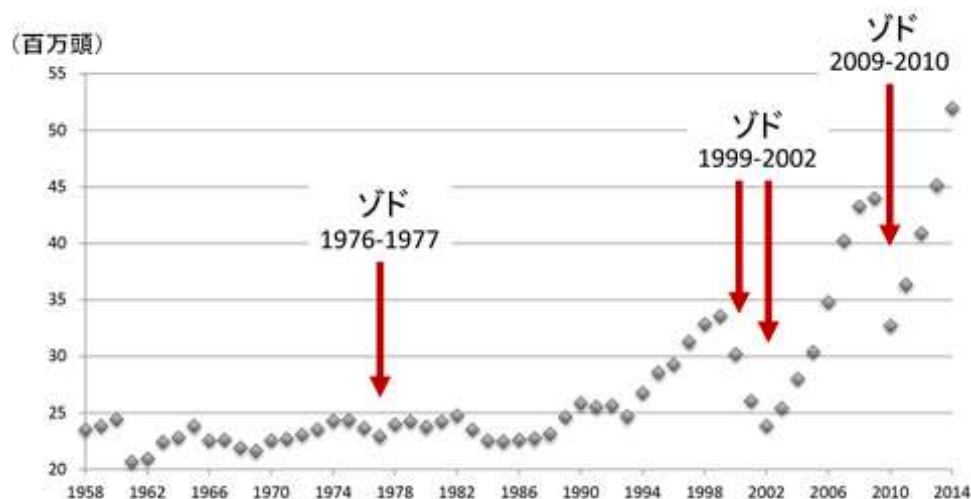
これらの結果からは、モンゴルにおける食肉価格の変動について2つの事が分かる。まず、ゾドによる家畜被害の影響が数年に亘り、食肉流通量の低下及び価格の高騰として市民生活に影響する事。また、食肉の価格は、ゾドの発生が無くても年間を通じて変動している事、である。ここ

では、放牧頭数の抑制に繋がる経済的インセンティブをどのようにして得るか、という事について考えるため、ゾドによる食肉価格への影響ではなく、年間を通じての食肉価格の変動について着目する。食肉価格が1年を通じて変動する事は、食肉価格が高い時期に食肉を売ればこれまでよりも多くの利益が得られる事を意味する。過放牧は、所得の少ない牧童が収入の増加を求めて行うものであるが、価格の高い時期に合わせて食肉を供給するだけで牧童は環境負荷の大きな過放牧に頼らなくても、より多くの収入を得る事が可能となる。また、この考え方は、年間を通じて食肉を安定的に供給する事に繋がるため、食肉の供給量と価格の面から消費者にとっても都合が良い。しかしながら、現在のモンゴルでは、食肉を冷凍貯蔵するため施設が整備されていない。このため、食肉価格差に基づく収入の増加をインセンティブとした牧童による過放牧の抑制を実現するためには、食肉の冷凍貯蔵を行うための設備の導入及び食肉流通能力を向上が必要であると考えられる。

2) 累進課税による放牧頭数の抑制

モンゴルは、1990年代の社会主義経済から市場経済への移行に伴い、政治・経済・社会の制度が大きく変化した。このような変化は、モンゴルの伝統的な産業である放牧にも影響しており、市場経済への移行後、何の準備もなく草原の利用を開放したため、収入の増加を求めた牧童達が一斉に家畜頭数を増やし、無秩序、且つ異常な過放牧が生じる事になった。これらの過放牧は、特に国際市場におけるカシミヤの高い取引価格が原因である。

このような過放牧状態も草原の生産力が十分に機能していれば、ある程度まで許容する事が可能であると考えられるが、気候変動に敏感な高緯度地域のモンゴルでは、永久凍土の融解と土壌水分の喪失、及び草地への水供給の著しい減少による草原生産力の劣化が起こっており、過放牧による負荷を吸収する事はできない。

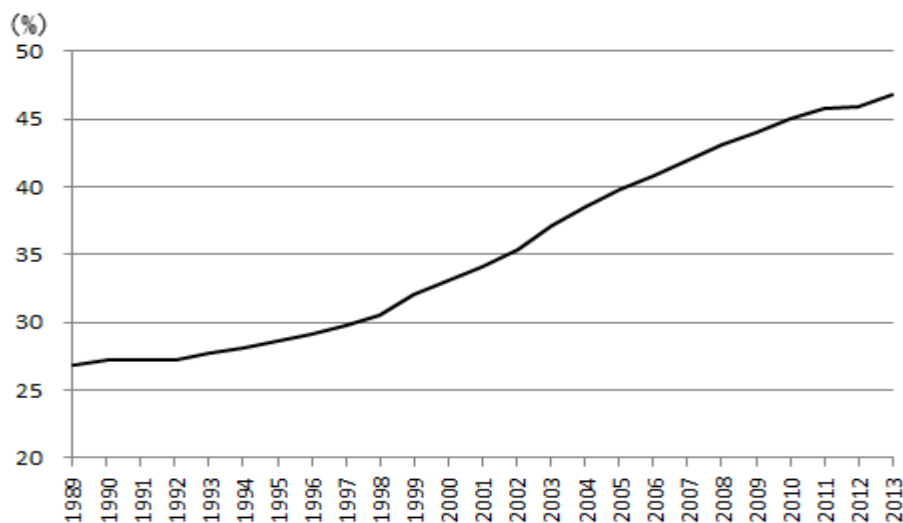


図(2)-21 モンゴルにおける総家畜数の変化 (1958年～2014年)

このような気候変動による草原環境の劣化は、当然、家畜の生育に影響する事が確実であるが、ゾド（雪害）発生時には、家畜の大量死をも引き起こす遠因ともなるため、更に草原環境を劣化させる過放牧を放置する事は、草原から糧を得ている牧童達にとって自らの生存を脅かす事になる。図(2)-21の2009年末～2010年にかけて発生したゾドでは、約970万頭（モンゴル全国の

家畜の約1/4)もの家畜が死亡し、モンゴルの経済、社会に大きなダメージを与えている。

ゾドによる家畜の大量死は、牧畜業者への直接的なダメージだけではなく、関連する産業、市民生活、及び都市の環境問題にまで影響が及ぶ。ここでの都市とは、首都ウランバートルの事であるが、ゾドによって資産(家畜)を失った牧童達が職を求め大量に流入するため、人口の増加に対して都市機能や制度の拡充が追い付かず、草原だけでなく、都市の環境も急速に悪化する事態となっている。ウランバートルの人口は、図(2)-22に示すように市場経済移行前には、モンゴルの全人口に対して、25%強で推移していたが、市場経済移行後、年々増加し続けた結果、2013年には全人口の45%を超えるまでになった。このような急激な人口集中によって首都ウランバートルには、土壤汚染や大気汚染等、様々な都市の環境問題が生じている。



図(2)-22 ウランバートル人口割合 (モンゴル統計局)

過放牧を抑制するためには、現在の家畜数を減らさなければならない。しかしながら、モンゴルにおける総家畜数は、1999～2002年及び2009～2010年に発生したゾドによる家畜の大量死を経ても更に家畜数は増加し続け、2014年には前回のゾド発生前の2008年における家畜総数(約4千5百万頭)を遥かに超える状況(約5千万頭強)となっている。このため、いつゾドによる家畜の大量死が発生してもおかしくない状態が続いている事になる。

モンゴルでは、従来から強い家畜だけを残し、弱い家畜は間引かれていた。また、牧畜社会において、牧畜が草原生産力によって維持されている事は良く理解されており、無制限に家畜を増やす事は牧畜社会にとって良い事ではないとの認識は共有されている。このため、個人が所有する家畜頭数にあるレベルの閾値を設けて(現在議論されているのは、50頭/人)、それ以上の家畜頭数に対して累進課税をかける案が検討されている。モンゴルでは、一般的な牧童の家族は4人家族であるため、1家族当たり200頭の家畜以下については無税、200頭を超える家畜に対して累進的に課税をかける事になる。

現在、牧童に対して一律の税がかけられており、生産手段である牧草地保全のために牧草使用料を支払う事については、牧童の間で基本的に合意できるものと考えられる。しかしながら、このような一律の税は、少数の大規模牧場経営の牧童に有利であり、家畜頭数が500頭以下の多くの零細な牧童家族にとっては不利な税制である。また、一律の税では、家畜数の増加に歯止めをか

ける事はできない。このため、累進課税の導入は、牧童にとって非常に公正な方法であると考えられるが、閾値や累進税率の決め方については、政治に深くからむ部分であり、合意は容易ではない。ここで、モンゴルにおけるゾド発生と家畜数について考えると、1990年以前の社会主義経済下では、家畜頭数は長く最大2千5百万頭を超える事はなく、自然現象としてのゾドは1976～1977年に発生しただけであった。しかし2000年以降の家畜総数の増加は、長いモンゴルの伝統的な放牧社会で行われていた家畜頭数を遥かに超えている。モンゴルにおける家畜総量規制政策については、1990年以前の家畜頭数を基に閾値と累進税率を検討する事が適当であると考えられる。

3) 放牧地への水資源利用・整備計画の提言

モンゴルでは、市場経済移行後、資金や部品の不足などから使用できない井戸（水場）が増えている一方、過放牧による家畜の数は増加している。放牧においては、家畜の餌となる草と同様、水も必要であるため、必然的に利用可能な水場を中心に草原環境が劣化していく事になる。

本研究では、SimSAGSによる環境容量評価システムを用いてアジア開発銀行（ADB）が行った水場の新設による牧畜への効果を調べた。調査を行ったBayanhonger県のKhureemaraalソムでは、水場を新設する事で家畜が増加し、家畜の分布が広がる事が確かめられたが、新設した水場の中には家畜の分布がほとんど見られない場所もあった。このため、水場の新設が必ずしも家畜の飼育に効果的であるとは言えないことが分かった。これらの結果から適切な位置に水場を設置しなければ、期待した効果が得られない事が分かる。このため、適応策の策定等においては、実施場所等について事前によく計画を吟味する必要がある事が分かった。家畜の移動には、地形や標高、草の密度等も影響する。このため、水場の設置に関しては、地形や標高及び衛星による植物活性度等の情報を用いて最適な水場の選定を行う必要があると言える。

（3）政策決定者への情報提供

本研究で得られた知見や家畜総量規制政策への提言等を政策決定者に提供するため、UNEPのアジア太平洋地域適応ネットワーク（APAN）によるシンポジウムや会議等での情報発信及び慶應義塾大学に設置されたKEIO-Node（図(2)-23）を通じた気候変動に関する情報配信を行った。

2015年3月4日、慶應義塾大学RCCCA(Research Center for Climate Change Adaptation)が、慶應義塾大学日吉キャンパスにおいて同時開催した第5回環境イノベータシンポジウムとAPAN北東アジア年次会議では、北東アジア等から合計45人の参加者及び14人の登壇者を迎え、「大規模な変化」と適応策におけるギャップを主テーマに一般参加者、学生、政策決定者、NPO、研究者等がそれぞれの適応策におけるギャップ理解について相互の確認と解決策に向けた議論が行われた。北東アジアでは、大規模な人口移動や都市への集中、自然災害の頻発、伝染病の急速な蔓延が起こっている。一方、地球温暖化や高齢化、環境汚染や生態系の悪化等は漸進しており、その影響も十分に把握する事が困難な状況にある。これらは、「脆弱さ」の原因であり、北東アジアがあらゆる「大規模な変化」に対して最も脆弱な地域の一つである事を結論づけている。



図(2)-23 APAN KEIO-NODE (<http://www.rc3a.org/>)

【慶應義塾大学で開催したシンポジウム】

- 1) The 3rd Environmental Innovators Symposium, Dec. 21-22, 2012, Keio Univ., Japan
- 2) The 4th Environmental Innovators Symposium, Jan. 15-16, 2014, Keio Univ., Japan
- 3) The 5th Environmental Innovators Symposium, Mar. 4, 2015, Keio Univ., Japan
- 4) Climate Change Adaptation and Green Development Planning in Mongolia, January 22, 2013, G-SEC Lab, 6th Floor, Global Security Research Institute, Keio University, Japan

【打ち合わせ等】

- 1) 日付：平成 26 年 8 月 18 日
場所：モンゴル環境・グリーン開発省
内容：Oyun 大臣、Dagvadorj 気候変動特使と会談を行い、モンゴルにおける気候変動適応策に関する意見交換を行った。
- 2) 日付：平成 26 年 8 月 18 日
場所：食料・農牧省
内容：食糧生産政策調整部の Narmandakh 部長と気候変動による食糧生産への影響と適応技術のニーズについて意見交換を行った。
- 3) 日付：平成 26 年 8 月 21 日
場所：モンゴル環境・グリーン開発省
内容：Oyun 大臣との会談し、今後の日蒙間の適応策実施について具体的な方向性について意見交換を行った。

【発表・講演】

- 1) 2013年12月3日に開催された文科省・環境省主催のシンポジウム「地球温暖化はどうか？-IPCCの最新科学的知見と日本からの貢献-」にて発表を行った。
- 2) 2013年8月26-29日、ロシア科学院、モンゴル科学院、内モンゴル師範大学及び中国科学院と(独)国立環境研究所(日本)が共催した「第9回モンゴル高原及び周辺地域の環境と持続可能な発展に関する国際会議」において科学的知見に基づく適応策について市民、企業、行政の人々への啓発活動を行った。
- 3) 2013年11月18日にワルシャワで開催されたCOP19での国連アジア太平洋地域適応ネットワーク(UNEP-APAN)のサイドイベントで各国の政策決定者に向けて発信した。
- 4) 2014年2月14日に開催されたIGES主催のシンポジウム「気候変動に関する最新の科学的知見とその総合的な対策について」にて発表を行った。
- 5) 2014年10月1-3日、第4回アジア太平洋気候変動適応フォーラム(クアラルンプール)にて発表を行った。
- 6) 2015年3月6-7日、第1回GAN(Global Adaptation Network)フォーラム(パナマ)にて発表を行った。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

気候変動の影響は、高緯度地域の永久凍土の融解と蒸発散による水資源喪失、及び大干ばつの頻発による草地への水資源供給の著しい減少として顕著に表れており、家畜増加による過放牧と相まって草原生産力劣化が急速に進行している。

本研究では、高緯度地域の永久凍土の融解と蒸発散による水資源喪失に関してSHAWモデルによる解析を行った結果、地球温暖化による凍土の融解とその影響について明らかにする事ができた。凍土の融解については、表層植物への凍土からの水分供給が停止した結果、植物の成長が遅れる事が分かった。この凍土の融解に起因した植物の成長に関する遅れは、家畜が必要とする餌の摂取を阻害する事になるため、家畜の生育不良からゾド発生時には甚大な家畜被害を生む事になる。また、植物の成長の遅れによって家畜が草の根まで食べ尽くす事になれば、実質的に過放牧と同様のダメージを草原環境に与える事になってしまう。NalaikhサイトにおけるSimSAGSモデルによる計算では既に草原の劣化がかなり進行している事が分かった。本研究では、草原に水場を新設最多際の適応効果について評価について同モデルを用いた計算を行った結果、水場の新設が家畜の生育環境を向上させる事が分かった。

本研究では、脆弱性指標(気温、降水量、牧草量、備蓄干し草量の関数)と家畜減耗率の関係から、指標値が0.2を超えると家畜減耗率が増加する事が見出され、脆弱性指標値に閾値(0.2)が存在する事が明らかにした。この事から脆弱性指標値を閾値(0.2)以下に低減させる事が適応策の目標値として設定し得る事が初めて判明した。このように、脆弱性を低下させる適応策の具体的数値目標が定量的に示された事により、適応策の効果を定量的に評価する事が可能となった。UNFCCCの適応委員会をはじめとして世界的に適応効果の定量的な評価の重要性が指摘されているが、科学的データに基づく評価方法は提示されてこなかった。今回モンゴルにおいて初めて脆弱

性とLoss&Damageとの定量的な関係性を提示し、且つ脆弱性指標値に閾値が存在する事を明らかにした意義は大きい。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省が平成26年度に行った「2020年以降の気候変動枠組における適応のあり方に関する懇談会」において、モンゴルにおける科学的知見を用いた適応計画への反映経験をもとに、2015年合意（2020年以降の気候変動に関する新たな枠組み）の中で、我が国として位置づけるべき適応の要素に対する考え方を提言した。また2020年以降の温室効果ガス排出削減の新たな枠組みにおける「適応」の位置づけについて、モンゴルで行っている「適応」と「緩和」の両方が満たされるような「グリーン開発」の事例をもとに「適応」の位置づけについての提言を行った。

平成25年度と平成26年度の第8回と第9回の「日本・モンゴル環境政策対話」において、本研究成果である気候変動に対するモンゴル草原及び牧畜社会の脆弱性評価、早期ゾド予報と適応オプション選択、適応策の経済的効果の評価、環境容量に基づく家畜頭数制限と草原保全等について、モンゴルでの気候変動適応策として提言を行い、モンゴル政府の環境政策に貢献した。

本研究により得られた研究成果を国連のアジア太平洋地域適応ネットワーク（APAN）等を通じ各国の政府関係者や政策決定者に向けて情報発信を行った結果、知見等の共有を行う事ができた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

日本政府とモンゴル政府は2015年2月10日に日・モンゴル経済連携協定（EPA）を締結した。食肉輸出による高付加価値商品へのインセンティブ付加が、環境容量の維持による草原保全をもたらすと同時に、GDPへの貢献をもたらすという本研究で行ったモンゴル適応策の経済効果の評価で得られた成果が有効に機能する可能性を示しており、結果として日・モンゴル経済連携協定（EPA）の環境政策への効果についても貢献したと考えている。

6. 国際共同研究等の状況

「モンゴルにおける革新的な適応システム開発」に関する共同研究をモンゴル国立大学及びモンゴル気象水文環境研究所と行った。モンゴル国立大学とは気候変動に対する放牧社会の脆弱性について、生態学的観点、文化人類学的観点及び経済学的観点からの共同研究を行い、モンゴルにおけるそれら基礎的知見の共有と革新的な適応システムの提言を行った。

モンゴル気象水文環境研究所とはIPCCに提出されている第5次報告書に基づく気候変動モデル結果とモンゴルでの過去の観測データとの比較を行い、それぞれのモデル結果の評価を共同で行った。またモンゴル全土及び主要な流域での水資源に関する知見の共有を図り、気候変動が水資源に与える影響評価について共同研究を行った。それぞれの機関からの参加者、所属は以下の通り。

モンゴル国立大学：

Dr. T.Chuluun, Director, Institute for Sustainable Development

Dr. B.Bat, Researcher, Institute for Sustainable Development

Dr. Tuvshintugs, Director, Economic Research Institute

Dr. A.Solongo, Institute for Sustainable Development

モンゴル気象水文環境研究所：

Dr.P.Gomboluudev, Scientific Secretary, Institute of Meteorology, Hydrology and Environment (IMHE)

Dr.G.Davaa, Head of hydrological section, IMHE

Ms.B.Erdenetsetseg, Head Agrometeorological section, IMHE

本プロジェクトはUNEP-APAN, UNEP-GAN との国際的連携のもと推進されている事から、これらの連携を通じてUNFCCCの適応委員会が行っているNational Adaptation Planning (NAP)との連携を通じて、モンゴルにおける国家適応計画作成への貢献としても位置付けられている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) WU, T-H., WANG, Q-X., ZHAO, L., DU, E., WANG, W., BATKHISHIG, O., DORIGOTOV, B., and WATANABE, M.: Environmental Earth Sciences. 67(7):1869-1876 (2012)
 “Investigating internal structure of permafrost using conventional methods and ground-penetrating radar at Honhor basin, Mongolia”
- 2) SUN, Z-G., WANG, Q-X., MATSUSHITA, B., FUKUSHIMA, T., OUYANG, Z., WATANABE, M., and GEBREMICHAEL, M.: Hydrological Sciences Journal, 58 (5) , 994-1012 (2013)
 “Further evaluation of the Sim-ReSET model for ET estimation driven by only satellite inputs”
- 3) 大場章弘、巖網林 : 沙漠研究, 24 (2) , 285-294 (2014)
 「景観生態区分による村落レベルの牧草生産力の評価」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) WANG, Q-X., WATANABE, M., BATKHISHIG, O., WU, T-H., and LIU, J-Y.: Proceedings of the 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Enkh-Amgalan S, Amangul Sh. (ed.) Institute of Geography, MAS, Ulaanbaatar, Mongolia, 111-116 (2012)
 “Detecting Permafrost Degradation and Ecosystem Vulnerability in Mongolia using an Early Warning Monitoring Network”
- 2) WANG, Q-X., WATANABE, M., BATKHISHIG O., CHULUUN, T., OKADERA T., YAN, W-L., WU T-H., and LIU J-Y: Proceedings of the IX international conference ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE

- DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS, 2, 26-29 (2013)
 “A Policy Contribution-Oriented Research Project “Vulnerability Assessment and Adaptation Strategies for Permafrost Regions in Mongolia”
- 3) T. OKADERA, WANG, Q-X., BATKHISHIG, O., and WATANABE, M.: Proceedings of the IX international conference ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS, 2:30-32 (2013)
 “Water for Energy Production in Mongolia”
- 4) SUN, Z-G., WANG, Q-X., WATANABE, M., and BATKHISHIG O.: Proceedings of the IX international conference ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS, 1, 89-92 (2013)
 “Investigation on relationship of climate change, grassland green-up and permafrost in Mongolian permafrost regions”
- 5) OBA, A., YAN, W-L., WATANABE, M., CHULUUN, T., and LHAAMAA, B-E.: Proceedings of the IX international conference ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN MONGOLIAN PLATEAU AND SURROUNDING REGIONS, 2:9-11 (2013)
 “Modeling Livestock Dynamics for Evaluation of Carrying Capacity by using SIMSAGS in Bayan Sum of Tuv Aimag, Mongolia”
- 6) 渡邊正孝: 環境省広報誌「エコジン」, 02・03月号, 14 (2015)
 「温暖化とゾド(寒雪害) —日本の協力で「適応策」を模索—」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) OBA, A., WATANABE, M., CHULUUN, T., BOLORDERDENE, L., YAN, W-L., and ZORIGT, E.: Planet under Pressure 2012. London, UK (2012)
 “Carrying capacity management for adaptation and sustainability of pastoral social-ecological systems in Mongolia”
- 2) OBA, A., YAN, W-L., WATANABE, M., CHULUUN, T., and LHAAMAA, B-E.: Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) 2012. Melbourne, Australia (2012)
 “Design of Livestock Management Tool for Climate Change Risk in Mongolia”
- 3) OBA, A., YAN, W-L., WATANABE, M., CHULUUN, T., and LHAAMAA, B-E.: The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Ulaanbaatar, Mongolia (2012)
 “Vulnerability of Socio-Ecological Systems Caused by Extreme Weather in Mongolia”
- 4) OBA, A., and YAN, W-L.: 59th Annual Meeting of Ecological Society of Japan (ESJ59) and the 5th EAFES International Congress. Otsu, Japan (2012)
 “Investigation of the Method for Evaluating Vulnerability of Socio-Ecological Systems in the Sum Scale of Mongolia”
- 5) OBA, A., and YAN, W-L.: EI Symposium 2012. Yokohama, Japan (2012)
 “Framework of Support Systems to Bridge the Gap between Policy and Practice for Early

- Adaptation to Extreme Weather in Mongolia”
- 6) OBA, A., and YAN, W-L.: ISAP2012 International Forum for Sustainable Asia and the Pacific. Yokohama, Japan (2012)
“Modeling Grazing System in Bayan Sum of Tuv Aimag, Mongolia”
 - 7) WANG, Q-X., WATANABE, M., LIU, J-Y., BATKHISHIG, O. and Y. YANG, YMP 16 - Ecological Consequences of Multiple Changes in Asia and Their Implications to Global Sustainability in ESA 97th Annual Meeting, Portland, Oregon, USA (2012)
“Dynamics of terrestrial ecological indicators in East Asia during last decades”
 - 8) WANG, Q-X., WATANABE, M., BATKHISHIG, O., WU, T-H., and LIU, J-Y.: The 8th International Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Surrounding Regions of the Mongolian Plateau. Ulaanbaatar, Mongolia (2012)
“Detecting Permafrost Degradation and Ecosystem Vulnerability in Mongolia using an Early Warning Monitoring Network”
 - 9) OBA, A., YAN, W-L., SUVDANTSETSEG, B., WATANABE, M., and CHULUUN, T.: Lkhamsuren Bolar-Erdane, AAG Annual Meeting. Los Angeles, Apr. 10, (2013)
“Development of the System for Early Adaptation to Climate Change in Mongolia”
 - 10) OBA, A., YAN, W-L., SUVDANTSETSEG, B., WATANABE, M., and CHULUUN, T.: 6th International Workshop on Remote Sensing and Environmental Innovations. Ulaanbaatar, Jun. 10 (2013)
“Development of Early Adaptation Systems for Local Communities”
 - 11) OBA, A., YAN, W-L., SUVDANTSETSEG, B., WATANABE, M., and CHULUUN, T.: The 14th Conference of the International Association for the Study of the Commons. Kita Fuji, Japan. Jun. 3-7 (2013)
“Development of a System for Early Adaptation to Climate Change in Mongolia”
 - 12) WATANABE, M.: Side Event Networking for Adaptation Knowledge & Action in Asia-Pacific, By Asia Pacific Adaptation Network at UNFCCC COP19. Warsaw, Poland, 18 Nov. (2013)
“Pathways toward Climate Compatible Development”
 - 13) WANG, Q-X., WATANABE, M., BATKHISHIG O., CHULUUN, T., OKADERA T., YAN, W-L., WU T-H., and LIU J-Y: Proceedings of the 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia. Aug.20-22, (2013)
“A Policy Contribution-Oriented Research Project on Vulnerability Assessment and Adaptation Strategies for Permafrost Regions in Mongolia”
 - 14) SUN, Z-G., WANG, Q-X., WATANABE, M., and BATKHISHIG O.: Proceedings of the 9th international conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions. Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia. Aug.20-22, (2013)
“Investigation on relationship of climate change, grassland green-up and permafrost in Mongolian permafrost regions”
 - 15) 岡寺智大, 王勤学, BATKHISHIG, O., 渡邊正孝: 日本地域学会 第50回 (2013年) 年次大会, 同

学術発表論文集 (2013)

「モンゴルのエネルギー供給による水需要に関する研究」

- 16) SUVDANTSETSEG, B., OBA, A., and YAN, W-L.: The 5th Environmental Innovators (EI) Symposium, Yokohama, Japan. Jan. 15, (2014)
 “Adaptation System Development with Science, Policy and Community Interfaces for Pastoral Resilience”
- 17) SUVDANTSETSEG, B., OBA, A., and YAN, W-L.: The 5th Environmental Innovators (EI) Symposium, Session 2: Embracing Change, Building Resilience with Communities. Yokohama, Japan. Jan.15-16 (2014)
 “Climate Change Adaptation System Development with Science, Policy and Community Interfaces for Pastoral Resilience”
- 18) WANG, Q-X., OKADERA, T. WATANABE, M., and YAN, W-L.: The 4th Asia-Pacific Climate Change Adaptation Forum. Kuala Lumpur, Malaysia, (2014)
 “Environmental Vulnerabilities and their Adaptation Strategies in Mongolia”
- 19) WANG, Q-X., YAN, W-L., WATANABE, M., BATKHISHIG, O., and DORJGOTOV, D.: The 5th Environmental Innovators (EI) Symposium, Session 2: Embracing Change, Building Resilience with Communities. Yokohama, Japan. Jan.15-16 (2014)
 “Land Degradation and Carbon Fixation RDU, E. ction in Permafrost Region of Mongolia”
- 20) WANG, Q-X., XIAO, Q-A., OKADERA, T. WATANABE, M., and BATKHISHIG, O.: IARU Sustainability Science Congress 2014, Copenhagen, Denmark, (2014)
 “Vulnerabilities caused by Climate Change and their Adaptation Strategies in Mongolia”
- 21) OBA, A.: Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia Workshop, Tokyo, Japan, January 13-15, (2015)
 “GWR Modeling for Zud Impact on Livestock”
- 22) WATANABE, M.: Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia Workshop, Tokyo, Japan, January 13-15, (2015)
 “Permafrost Melting as Critical Slow Variable for Gradual Drying in the Tuul River Basin”
- 23) OKADERA, T.: International workshop on Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia, Tokyo, Japan, (2015)
 “Water for energy production in Mongolia”
- 24) WANG, Q-X., XIAO, Q-A., EER DENI, OKADERA, T. WATANABE, M., and BATKHISHIG, O.: International workshop on Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia, Tokyo, Japan, (2015)
 “CO2 Sequestration by Rangeland in Mongolia”
- 25) TAKEDA S. and WATANABE, M.: Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia Workshop, Tokyo, Japan, January 13-15, (2015)
 “Computable General Equilibrium Model for Economical Evaluation of Zud Event”

- 26) YAN, W-L.: Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia Workshop, Tokyo, Japan, January 13-15, (2015)
“Planning and Building the Adaptive Network for the Production and Distribution of Livestock and Meat in Mongolia”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国連のアジア太平洋地域適応ネットワーク (UNEP-APAN) ホームページ (2013年5月7日)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞 (2014年2月27日、全国版、1-2面、「地球異変」)
- 2) 上毛新聞 (2015年1月1日、50頁)
- 3) 下野新聞 (2015年1月3日、10頁)
- 4) 茨城新聞 (2015年1月8日、12頁)
- 5) 神奈川新聞 (2015年1月1日、17頁、「モンゴル・ルポ」)
- 6) 静岡新聞 (2015年1月1日、7頁、「世界で進む「適応策」」)
- 7) 伊勢新聞 (2015年1月5日、4頁)
- 8) 佐賀新聞 (2015年1月1日、10頁、「現地・ルポ」)
- 9) 熊本日日新聞 (2015年1月3日、20頁)
- 10) 宮崎日日新聞 (2015年1月1日、20頁、「モンゴル・ルポ」)
- 11) 東奥日報 (2015年1月3日、16頁、「モンゴル・ルポ」)
- 12) 高知新聞 (2015年1月3日、32頁、「温暖化の被害低減へ」)
- 13) 山陽新聞 (2015年1月3日、14頁、「モンゴル・ルポ」)
- 14) 京都新聞 (2015年1月5日、16頁、「モンゴル ルポ」)

(6) その他

- 1) 渡邊正孝教授：モンゴル功労賞、2014

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

Vulnerability Assessment and Adaptation Strategies for Permafrost Regions in Mongolia

Principal Investigator: Qinxue WANG

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)

16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN

Tel: +81-29-850-2128 / Fax: +81-29-850-2128

E-mail: wangqx@nies.go.jp

Cooperated by: Keio University

[Abstract]

Key Words: Global warming, Degradation of permafrost, Environmental carrying capacity, Vulnerability assessment, Adaptation strategies

Since 1940, the annual mean air temperature in Mongolia has increased by 2.1°C. Because a significant part of the country's population relies on climate-dependent sectors foLI, R. velihood, Mongolia is one of the countries most vulnerable to climate change. The objectives of this study were: (1) to detect the degradation of permafrost and to evaluate the vulnerabilities of grassland ecosystems caused by the degradation of permafrost by using both satellite and ground observation data through an early observation network, and (2) to develop evaluation systems to assess both environmental carrying capacity and the economic effects of adaptation measures, and finally to make recommendations for policies on the regulation of the total numbers of livestock.

To detect the degradation of permafrost, we developed a map of permafrost for the most recent decade (2000s) with a high spatial resolution of 1-km using MODIS land-surface temperature datasets. We also predicted the future permafrost in 2090s in a scenario of RCP8.5 in IPCC AR5, and found that the area of continuous and discontinuous permafrost will become confined to only mountainous regions, and the island-shaped permanent area might be reduced to approximately 1/5 of its current area by the end of this century.

To assess the effects of climate change on the degradation of permafrost, we employed the Simultaneous Heat and Water (SHAW) model. The results indicated that thawing of the frozen ground at the test site of Nalaikh had progressed over the previous 40 years (from 1970 to 2010) to the extent that water had stopped being released from the frozen ground in the mid-2000s. An insufficient water supply from the soil is believed to be associated with poor

plant and livestock growth and is highly likely to increase the damage to livestock when zuds occur.

To assess environmental carrying capacity, we developed an assessment system based on the Simulation of a Semi-arid Grazing System (SimSAGS) model. The results of the analysis revealed that livestock numbers far exceeded the environmental carrying capacity, resulting in overgrazing.

To assess livestock farming vulnerability for the evaluation of the relationship between pasture degradation and livestock loss, we developed a new index by supplementing the drought and zud index with indexes for livestock grass consumption and hay preparation. As a result, we discovered that when the vulnerability index exceeds a value of 0.2, the rate of livestock loss starts to increase.

We also developed a system to assess the economic effects of adaptation measures using a computable general equilibrium model. The results of analyzing economic effects demonstrated that improvements in technologies relating to meat processing and distribution are urgently required to be in place in the Mongolian meat industry.

Finally, to make recommendations for policies on the regulation of the total numbers of livestock, we considered three options: One was the option of imposing controls on the number of permitted grazing livestock, while utilizing the economic incentive derived from timing the sale of meat according to fluctuations in Mongolia's meat prices. The next option was levying a progressive tax on individuals according to the number of livestock personally owned. The last option was expanding the utilization of water resources and the construction of water points for pasture land. We disseminated information relating to climate change vulnerability assessment and the formulation of adaptation measures to policymakers via UNEP-Asia Pacific Adaptation Network (UNEP-APAN), as well as the Japan-Mongolia Environmental Policy Dialogue.